

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

А.Е. Трянов, О.А. Гришанов, С.В. Бутылкин

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ
СИСТЕМ СУФЛИРОВАНИЯ
МАСЛЯНЫХ ПОЛОСТЕЙ
АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2006



**Инновационная образовательная программа
"Развитие центра компетенции и подготовка
специалистов мирового уровня в области аэрокосми-
ческих и геоинформационных технологий"**

Рецензенты: Заместитель Генерального конструктора
ОАО «СНТК им. Н.Д.Кузнецова» С.М. Игначков,
докт. техн. наук, проф. В.Б. Балякин

Трянов А.Е.

Проектирование систем суфлирования масляных полостей авиационных двигателей: учеб. пособие / *А.Е. Трянов, О.А. Гришанов, С.В. Бутылкин.* – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 83 с.: 62 ил., 5 табл., 18 библ. назв.

ISBN

Учебное пособие знакомит с основными особенностями систем суфлирования масляных полостей авиационных ГТД и конвертированных двигателей, используемых в качестве энергоприводов. При этом содержит рекомендации по проектированию таких систем и по выбору конструкции приводного центробежного суфлёра.

Учебное пособие предназначено для студентов факультета двигателей летательных аппаратов, обучающихся по специальности "Авиационные двигатели и энергетические установки". Подготовлено на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов.

УДК.621.45.00.11.001.2
ББК 27.5.14.4

ISBN

© Трянов А.Е., Гришанов О.А., Бутылкин С.В., 2006
© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2006

Оглавление

Введение	4
1. Назначение системы суфлирования. Основные требования к ней	5
2. Состав элементов системы суфлирования	7
3. Особенности физического состояния воздухомасляной смеси в системе суфлирования	8
4. Конструкции суфлёров, применяемых в двигателях	12
5. Разновидности рабочих колёс суфлёров радиального типа	16
6. Методика экспериментальной проверки эффективности рабочих колёс суфлёров	21
7. Отраслевой стандарт на рабочие колёса суфлёров радиального типа	24
7.1. Факторы, влияющие на сепарирующую способность суфлёра	24
7.1.1. Влияние частоты вращения	24
7.1.2. Влияние наружного диаметра	25
7.1.3. Влияние ширины колеса	26
7.1.4. Влияние угла установки лопатки	28
7.1.5. Гидравлическое сопротивление колеса	28
7.2. Обобщение результатов экспериментальных исследований	29
8. Рабочие колёса с повышенной эффективностью	32
8.1. Сотовое рабочее колесо	32
8.2. Рабочее колесо со вставкой из металлорезины	33
9. Суфлёр с предварительной закруткой потока воздухомасляной смеси	34
10. Принципиальные схемы систем суфлирования, реализованные в отечественных и зарубежных ГТД	36
10.1. Объединённые системы суфлирования масляных полостей	37
10.1.1. Двигатель RB-211	37
10.1.2. Двигатель Д-27	37
10.2. Суфлирование масляных полостей с использованием откачивающих насосов	38
10.3. Схемы суфлирования с размещением суфлёров на валу двигателя	40
10.3.1. Двигатель CF6-50	40
10.3.2. Двигатель CFM-56	41
10.4. Комбинированные схемы с автономным суфлированием масляных полостей опор	41
10.4.1. Двигатель НК-8-2У	41
10.4.2. Двигатель НК-86	43
10.4.3. Двигатель НК-93	43
11. Особенности использования эжектора в системе суфлирования	45
12. Выбор пропускной способности системы суфлирования	56
13. Взаимодействие масляной системы и системы суфлирования	60
14. Основные принципы проектирования систем суфлирования авиационных ГТД	63
15. Выбор рациональной схемы системы суфлирования теплонапряжённого ТРДД	66
16. Порядок проектирования системы суфлирования	71
17. Обеспечение эффективности системы суфлирования авиапроизводных энергетических установок	74
Заключение	78
Список литературы	79
Приложение	80

Введение

В авиационном двигателестроении за более чем полувековую историю накоплен большой опыт в разработке различных конструкций газотурбинных двигателей. Многообразие типов созданных двигателей характерно тем, что каждый разработчик ГТД имеет собственные традиционные подходы к их проектированию, внося в конструкцию узлов и в системы двигателей свои отличительные особенности. Это касается как отечественных, так и зарубежных опытно-конструкторских бюро. В связи с существованием многих школ создания ГТД в каждой из них накоплен свой опыт проектирования, доводки и эксплуатации двигателей, который, как правило, имеет весьма ограниченную открытую публикацию.

Современные учебники по конструкциям авиационных ГТД, цель которых дать будущим специалистам комплекс знаний в области проектирования, не в состоянии достаточно полно отразить имеющуюся у специалистов ОКБ информацию по отдельным узлам и системам двигателей. Проблема заключается в разрозненности имеющихся материалов, которые не систематизированы, а в отдельных случаях имеет место полное отсутствие соответствующих литературных источников, что вызывает определённые трудности при самоподготовке студентов по тем или иным вопросам. В частности, по масляным системам и системам суфлирования масляных полостей авиационных ГТД основные особенности их проектирования, доводки и эксплуатации до настоящего времени в литературе недостаточно освещены. А рекомендации по выбору схем суфлирования и порядку их проектирования в учебниках отсутствуют. А вместе с тем задача выбора рациональной схемы суфлирования масляных полостей сама по себе является актуальной, т.к. данная система оказывает непосредственное влияние на надёжность и эффективность функционирования масляной системы двигателя. Более того, с учётом тенденции развития двигателестроения по пути усложнения кинематических схем ГТД и непрерывного повышения их теплонапряженности роль системы суфлирования в этом плане становится всё более важной. Кроме сложных гидравлических вопросов, связанных с двухфазностью потоков в каналах суфлирования, на передний план выходят вопросы предотвращения коксования масла в этих каналах в зоне турбины.

В данном учебном пособии проведен комплексный подход к вопросам проектирования масляных полостей ГТД.

1. Назначение системы суфлирования. Основные требования к ней

Обеспечение работоспособности авиационного ГТД немыслимо без масляной системы. Как известно, масляная система двигателя предназначена для осуществления непрерывной подачи масла к подшипникам, зубчатым колёсам, контактными уплотнениями и к другим узлам трения с заданными величинами температуры и давления на всех режимах работы двигателя в ожидаемых условиях эксплуатации.

Масло является рабочей жидкостью, используемой как для смазки трущихся элементов, так и для отвода тепла от них. При этом у современных авиационных ГТД обеспечение приемлемого теплового состояния узлов трения является существенно более важной функцией масляных систем по сравнению с обеспечением смазки трущихся поверхностей [1]. Так, например, для смазки теплонапряженного радиально-упорного шарикоподшипника может оказаться достаточным весьма незначительного количества масла (не более 0,1 кг/ч), а для съёма выделяемого в нём тепла (10...20 кВт) требуется подавать до 0,15 кг/с масла. Исходя из этого, в авиационных ГТД используют масляные системы циркуляционного типа, в которых масло бесперебойно совершает циклическое движение в замкнутом контуре. При этом надёжное функционирование масляной системы возможно только при её согласованной работе с системой суфлирования, которая в свою очередь зависит от работоспособности уплотнений масляных полостей двигателя.

В конструкциях опор роторов ГТД с целью отделения масляных полостей двигателя от воздушных применяют подвижные уплотнения, устанавливаемые между валами и статором. Типы используемых в опорах ГТД уплотнений многообразны, но наиболее часто применяют лабиринтные и контактные графитовые уплотнения. Как известно, для того, чтобы предотвратить утечку масла через любое уплотнение давление воздуха перед ним должно быть больше, чем давление внутри масляной полости. При создании указанного перепада давления воздух непрерывно будет проникать внутрь масляных полостей опор, препятствуя утечкам масла из них. Очевидно, что для исключения возможности накопления в масляных полостях воздуха, которое приводило бы к уменьшению перепада давления на уплотнениях (в пределе – до нуля), необходимо осуществлять равновесный отвод воздуха из масляных полостей, как на постоянных, так и на переменных режимах работы двигателя. Эту функцию выполняет система суфлирования. Ниже приведены основные требования, предъявляемые к ней.

1) Система суфлирования двигателя должна обеспечивать непрерывный отвод воздуха, проникающего через уплотнения масляных полостей опор при всех эксплуатационных условиях в пределах, необходимых для поддержания в полостях опор, масляном баке и коробке приводов агрегатов допустимых уровней давлений, оговариваемых в техническом задании на создание нового двигателя.

2) Система суфлирования должна иметь достаточный запас по пропускной способности суфлёров и её отводных каналов с целью исключения возможности выброса масла из маслобака или утечек масла через уплотнения масляных полостей опор.

3) В системе суфлирования должен быть предусмотрен предохранительный клапан, исключающий возможность возрастания давления в масляных полостях (в том числе и в маслобаке) выше допустимой нормы. Если система суфлирования маслобака имеет избыточную пропускную способность, обеспечивающую отвод увеличенного (в пределах допустимых нормативов [12]) расхода воздуха без превышения установленного предельного уровня давления, то данный клапан допускается не устанавливать.

4) Принципиальная схема системы суфлирования масляных полостей современного ГТД должна предопределять компактность и высокое конструктивно-весовое совершенство соответствующих элементов двигателя

5) Система суфлирования должна обеспечивать необходимые предпосылки для снижения величины эксплуатационного расхода масла в ГТД.

6) Схемно-конструктивное исполнение системы суфлирования должно исключать возможность возникновения опасных последствий для летательного аппарата при отказе одного или нескольких уплотнений масляных полостей опор двигателя.

7) Конструкция каналов суфлирования масляных полостей опоры турбины и их тепловая защита должны обеспечивать температурный режим внутренних стенок этих каналов, исключая возможность отложения в них продуктов деструкции масла (нагарообразования) выше допустимых норм, оговоренных в технической документации двигателя.

8) Конструкция и площади проходных сечений каналов отвода масловоздушной смеси из опор ротора должны быть выбраны, исходя из условия исключения возможности «запирания» суфлёров или отводных каналов системы суфлирования вследствие достижения в них звуковых скоростей.

9) Система суфлирования должна надёжно функционировать в течение установленного ресурса работы двигателя.

10) Элементы, входящие в состав системы суфлирования, должны соответствовать требованиям эксплуатационной технологичности и ремонтпригодности.

11) Трудоёмкость технического обслуживания системы суфлирования должна быть минимальной.

12) В системе суфлирования должен быть предусмотрен контроль величины давления в характерных точках (например, на входе в суфлёр) с целью использования его в качестве диагностического средства при проявлении дефекта в работе уплотнений масляных полостей.

Трудно переоценить роль системы суфлирования в плане создания условий, необходимых для обеспечения надёжной работы подвижных уплотнений валов в масляных полостях опор. При этом следует учесть, что утечки масла из масляных полостей недопустимы не только по соображениям безвозвратности потерь масла или из-за возможности замасливания элементов конструкции. Утечки масла внутри двигателя опасны возможными последствиями: в зоне турбины они могут воспламениться и вызвать перегрев и разрушение элементов этого узла, а в зоне компрессора они в виде паров и аэрозоля могут попасть в воздух, отбираемый в систему кондиционирования самолёта. В соответствии с требованиями Авиационных правил двигатель, у которого проявляются такие дефекты, не может быть сертифицирован.

2. Состав элементов системы суфлирования

В современных ГТД с масляной системой циркуляционного типа непосредственный отвод воздуха из масляных полостей и отвод его из системы суфлирования без сепарации невозможен, так как в нём содержится распылённое масло, и эксплуатационный расход последнего составил бы десятки литров в час. Сепарирующие устройства, в которых осуществляется отделение масла от воздуха, удаляемого из системы суфлирования, бывают статического или динамического типа. В статических сепараторах нет подвижных элементов, и принцип их работы основан на осаждении частиц масла на стенках каналов, создающих искривление траектории потока воздухомасляной смеси. К такому типу сепараторов относятся неподвижные воздухоотделители типа «циклон» или «лоток».

В современных авиационных ГТД практически во всех двигателях в системах суфлирования используют приводные динамические сепараторы, получившие название центробежных суфлёров. В системе суфлирования масляных полостей опор, маслобака и коробок приводов обязательно устанавливают один или несколько суфлёров, выполняющих функцию очистки от частиц масла воздуха, удаляемого из масляных полостей. При этом должна быть обеспечена возможность возвращения в масляную систему отделённого в суфлёрах масла. В зависимости от места расположения и габаритов агрегата может быть использован либо суфлёр с осевым входом, либо суфлёр с радиальным входом (см. раздел 4). В теплонапряжённых двигателях с высоким уровнем давлений в масляных полостях турбины для предварительного отделения масла от воздуха возможна установка перед суфлёром дополнительных сепарирующих устройств статического типа.

Отвод из масляных полостей воздуха по системе суфлирования, как правило, производят в зону пониженного давления. Поэтому в состав системы суфлирования должны входить коммуникации, соединяющие масляные полости с зоной сброса очищенного воздуха. При использовании в отводных каналах устройств, повышающих давление, таких как эжекторы или насосы, воздух из них можно сбрасывать в зоны с большим давлением. Например, воздух, отведённый из суфлёра с помощью эжектора, можно утилизировать в наружном контуре ТРДД.

Как известно, маслобак, помимо нагнетающих и откачивающих магистралей, также может быть соединён с атмосферой или с коробкой приводов. Для предотвращения в нём забросов давления выше допустимого уровня в маслобаке устанавливают предохранительный клапан.

При полётах на больших высотах уровень давления в масляных полостях может оказаться недостаточным для обеспечения нормальной работы системы откачки масла. Поэтому в случае необходимости для создания на входе в насосы избыточного давления в системе суфлирования на выходе из суфлёра устанавливают так называемый «высотный» клапан. Более подробно вопрос о влиянии системы суфлирования на «высотность» масляной системы рассмотрен в разделе 13.

3. Особенности физического состояния воздухомасляной смеси в системе суфлирования

При выборе геометрических и кинематических параметров устройств, предназначенных для сепарации масла в системе суфлирования, было бы желательно иметь сведения о фракционном (гранулометрическом) составе частиц масла и их массовой или объёмной доле в поступающей к ним воздухомасляной смеси. В масляных полостях опор и коробки приводов при подаче к их узлам трения масла из форсунок происходит дробление струй и перемешивание образовавшихся частиц масла с воздухом, втекающим в масляные полости опор через подвижные уплотнения валов. Кроме первичного образования капель и частиц масла, происходят процессы их раздробления, а также коагуляционного роста размеров частиц. Течение образовавшейся двухфазной смеси по каналам суфлирования также сопровождается осаждением капель масла на их поверхностях. Очевидно, что, ввиду сложности взаимодействия фаз и многофакторности влияния происходящих при этом процессов массообмена на современном уровне знаний, точное расчётное определение дисперсности частиц масла в воздухомасляной смеси выполнить не представляется возможным. Поэтому количественная оценка фракционного состава частиц масла носит, в основном, эмпирический характер. В большинстве научных работ, касающихся распыления жидкости, используют критерий Вебера:

$$We = \frac{2\rho_A u^2 r}{\sigma}, \quad (3.1)$$

где ρ_A – плотность газа;

u – относительная скорость обтекания частиц жидкости потоком воздуха;

r – радиус капли жидкости;

σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

По сведениям авторов различных исследований, величина критерия We находится в диапазоне от 3,5 до 25. Эксперименты показывают, что капля начинает деформироваться и дробиться, когда скорость её обтекания воздухом возрастает до величины, при которой критерий We находится в диапазоне от 15 до 20, что соответствует турбулентному режиму течения.

$$\text{Время дробления капель } t_A = \frac{\mu_A r}{\sigma \left(\frac{We}{18,2} - 1 \right)}, \quad (3.2)$$

где μ_A – коэффициент динамической вязкости.

Эксперименты показывают, что процесс дробления протекает чрезвычайно быстро и может в полной мере осуществляться на участке траектории капли, соответствующем характерным линейным размерам масляных полостей опор и коробок приводов. Поэтому гранулометрический состав капель на входе в канал суфлирования будет определяться главным образом процессом их дробления. При относительно небольшой длине трубопровода от полости опоры до суфлёра, характерной для систем суфлирования авиационных ГТД, вторичными процессами оседания частиц на стенках каналов можно пренебречь. Однако для газотурбинных установок, где выгоднее использовать трубопроводы с увеличенным проходным сечением (т.е. с низкими скоростями течения, обеспечивающими снижение гидравлического

сопротивления), агрегаты суфлирования могут быть вынесены на значительное расстояние. При свойственной такому режиму течения смеси дисперсно-кольцевой структуре потока наиболее существенным фактором, определяющим спектр размеров капель в ядре потока, является массообмен между ядром потока и плёнкой жидкости, текущей по стенке канала. В этом случае необходимо учитывать коагуляцию частиц и оседание более крупных из них на стенках трубопроводов, а также дробление сорвавшихся со стенок капель.

Значительные трудности для расчётной оценки дисперсности смеси и структуры течения представляет определение относительной скорости обтекания образовавшихся капель потоком в масляных полостях и в каналах произвольной формы, тем более что на эту скорость накладываются пульсации её вектора, вызванные турбулентным режимом течения потока.

Описанный выше механизм образования, дробления и оседания капель масла в потоке воздуха, протекающего через масляные полости и систему суфлирования, определяет спектр размеров частиц. Экспериментальными исследованиями [16] установлено, что в каналах системы суфлирования при величине отношения длины канала к его диаметру (l/d) более 14 данный спектр достаточно точно описывает распределение функционального вида

$$\alpha(r) = 1 - e^{-\left(\frac{r}{r_c}\right)^2} \quad (3.3)$$

где r – радиус капли;

$\alpha(r)$ – доля капель (объёмная или массовая) с радиусом меньше r ;

r_c – характерный радиус капли (ему соответствует $\alpha(r_c) = 0,632$).

График указанного распределения приведен на рис. 1.

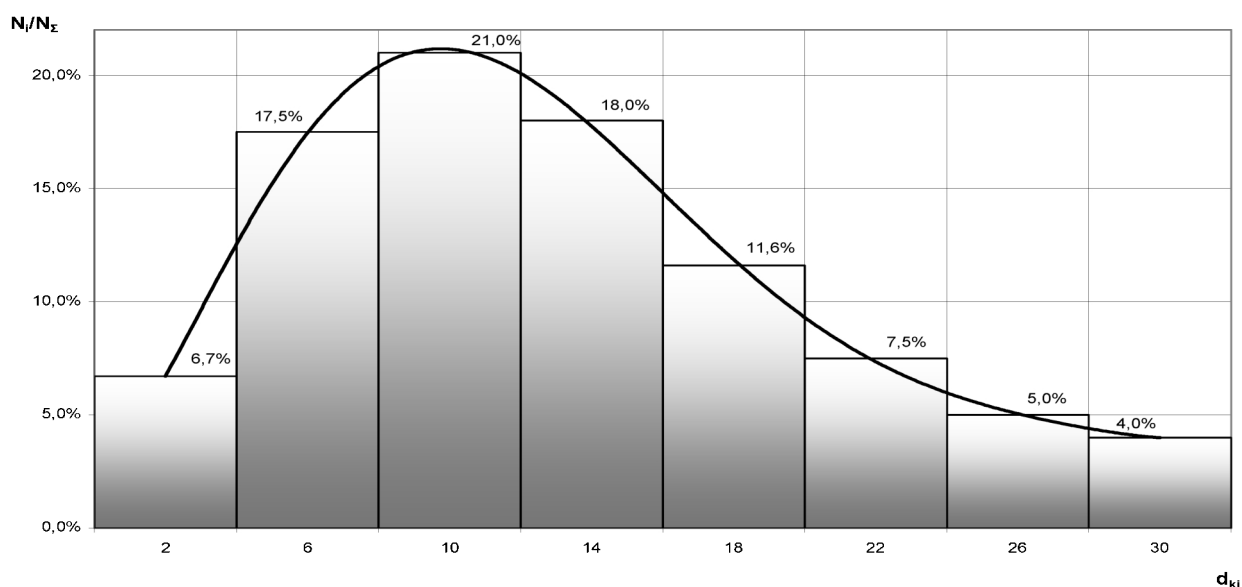


Рис. 1. График распределения относительного количества капель масла по их диаметру

Кроме распределения капель по размерам, влияющего на процесс сепарации масла в рабочем колесе суфлёра, немаловажное значение имеет структура потока воздухомасляной смеси. Последняя оказывает значительное влияние на гидравлическое сопротивление каналов суфлирования. Известно множество исследований воздухо-водяного потока, где результатами являлись обобщающие зависимости [17, 18]. Исследования же течения воздухомасляной смеси в магистралях масляной системы проводились, как правило, с узкой прикладной направленностью для решения практических задач. При этом сведения о результатах такого рода экспериментов зачастую ограничены внутренними отчётами предприятий и в общедоступной технической литературе отсутствуют. В связи с этим при расчётных исследованиях процессов, протекающих в системе суфлирования ГТД и касающихся влияния структуры потока на свойства двухфазного потока, приходится использовать эмпирические зависимости,

установленные для воздухо-водяной или других двухфазных смесей (при условии их представления в общем виде, не связанном со свойствами конкретных жидкостей и газов).

Примером такого обобщения является известная эмпирическая диаграмма Бейкера, описывающая существование определённой структуры потока в зависимости от величин, характеризующих относительные расходы фаз. В зонах диаграммы (рис. 2), где тип течения не обозначен, структура потока имеет переходный характер [17].

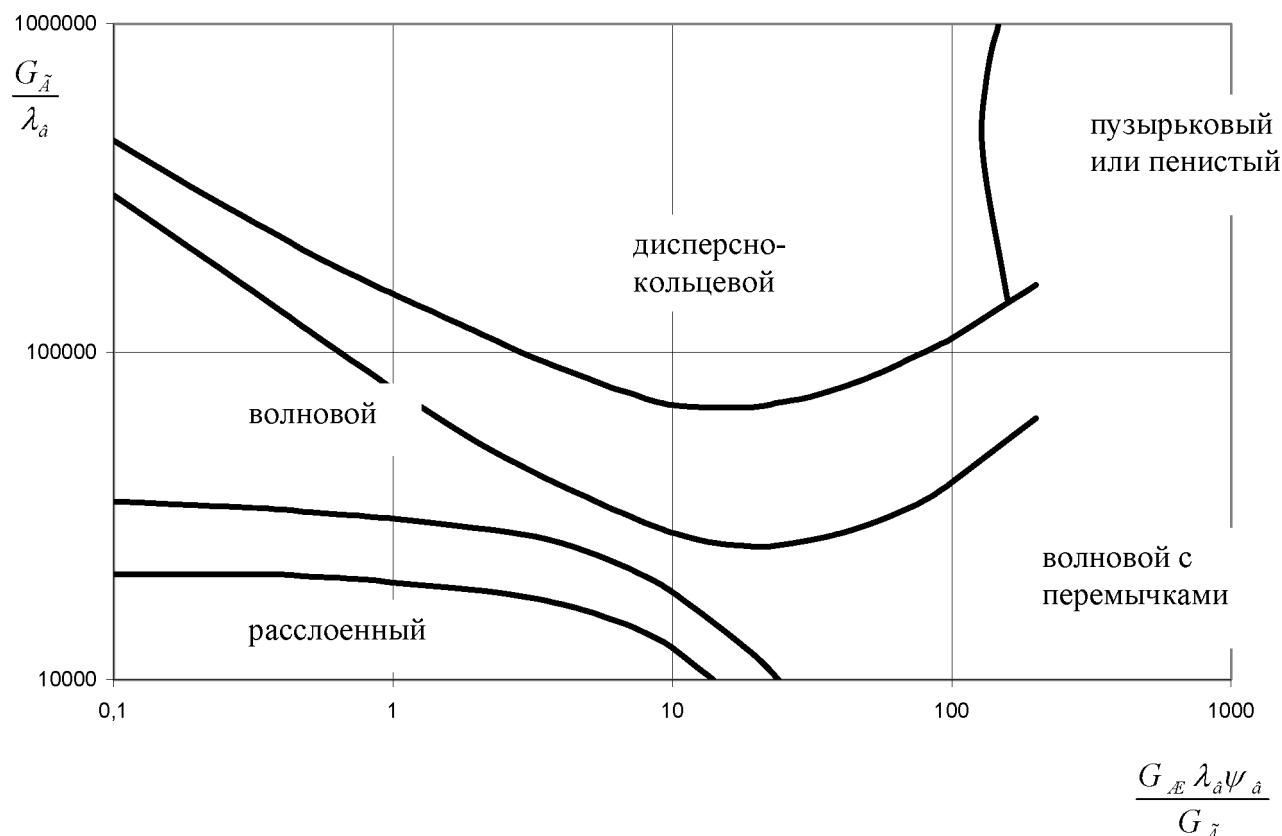


Рис. 2. Диаграмма режимов течения двухфазного потока в горизонтальном канале (диаграмма Бейкера)

В координатах данного рисунка использованы следующие входящие в них комплексы:

$$\lambda_{\tilde{A}} = \left[\left(\frac{\rho_{\tilde{A}}}{\rho_{\tilde{A}}} \right) \left(\frac{\rho_{\tilde{E}}}{\rho_{\tilde{W}}} \right) \right]^{0,5} ; \quad \psi_{\tilde{A}} = \left(\frac{\sigma_{\tilde{W}}}{\sigma_{\tilde{E}}} \right) \left[\frac{\mu_{\tilde{E}}}{\mu_{\tilde{W}}} \left(\frac{\rho_{\tilde{W}}}{\rho_{\tilde{E}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} ; \quad (3.4)$$

а индексы обозначают: Г – газ; Ж – жидкость; А – воздух; W – вода.

Следует особо отметить специфическую особенность течения двухфазных сред вообще и воздухомасляной смеси в частности, заключающуюся в том, что в них происходит резкое уменьшение скорости звука (в зависимости от соотношения фаз и структуры потока). Так, например, известно выражение, определяющее величину скорости распространения упругих возмущений в гомогенной среде, упрощённое из более строгой зависимости, справедливой для существенно большей плотности жидкой фазы по сравнению с газовой [17]:

$$c_{\tilde{m}}^2 = \frac{c_{\tilde{A}}^2 \rho}{\rho_{\tilde{E}} \alpha (1 - \alpha)}, \quad (3.5)$$

где: $c_{\tilde{A}}$ - скорость распространения звука в газе,

α - объёмная доля содержания газа в двухфазной смеси.

Очевидно, что скорость распространения звука в двухфазной смеси минимальна при $\alpha=0,5$. Ниже в качестве примера на рис. 3 приведены результаты расчётной оценки величины скорости звука в воздухомасляной смеси при различной величине объёмного газосодержания (при фиксированном расходе масла 0,75 кг/с и переменном расходе воздуха).

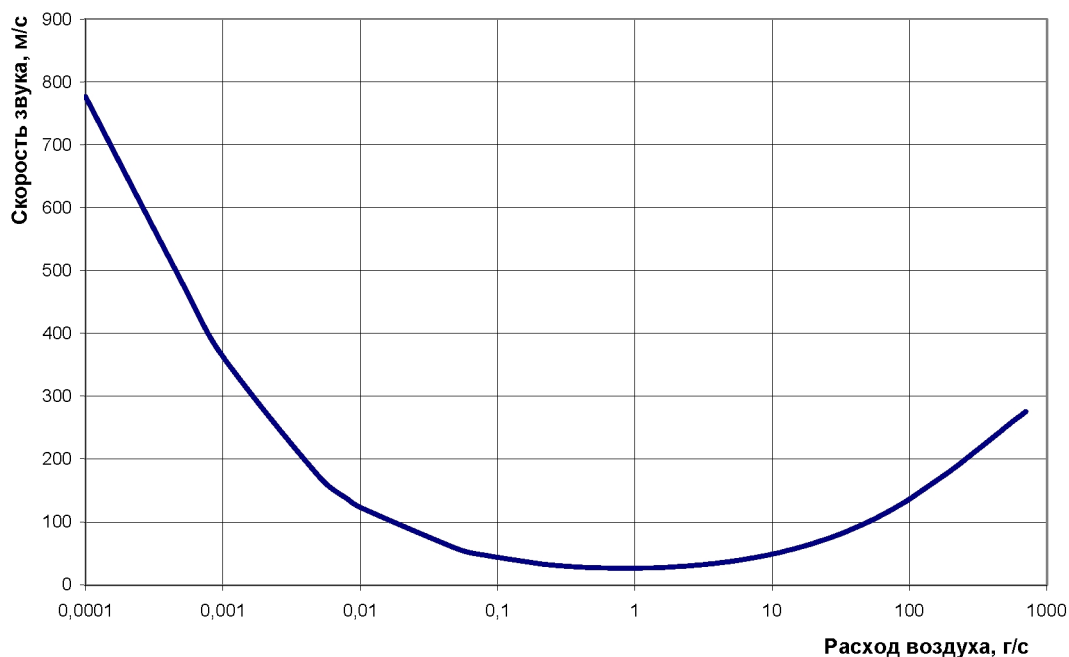


Рис. 3. Зависимость скорости распространения звука в гомогенной воздухомасляной среде от содержания в ней воздуха

Из приведенного выше следует, что критическая скорость течения воздухомасляной смеси может быть достигнута при скорости потока практически на порядок меньшей, чем у чистого воздуха. Это означает, что даже при малых скоростях потока в канале суфлирования (примерно 30 м/с) может иметь место его «запирание». При этом никакое уменьшение давления на выходе из канала не будет приводить к соответствующему понижению давления в суфлируемой масляной полости. Естественно, что таких режимов, приводящих к запиранию каналов, при проектировании и доводке систем суфлирования необходимо избегать.

На практике существует множество способов измерения газосодержания в двухфазной смеси – от грубого, при котором определяется лишь объёмное соотношение фаз, до точных, позволяющих оценивать характерные размеры включений каждой из фаз потока. К первым можно отнести, например, метод отсечных колб, при котором смесь отводится в байпасный участок известного объёма, снабжённый отсечными клапанами, а после отстоя смеси определяют объём находившейся в данной полости жидкой фазы. К более точным относятся оптические, акустические и электростатические способы определения сплошности потока. Данные методы описаны в специальной литературе, посвящённой экспериментальным исследованиям двухфазных течений и средствам измерения параметров потока. Они могут быть использованы при доводке масляных систем и систем суфлирования.

Как было отмечено ранее, информация о характеристиках процессов, протекающих в каналах системы суфлирования, имеет ограниченный характер. Кроме этого, в литературных источниках отсутствуют справочные данные по теплофизическим свойствам воздухомасляных смесей, необходимые для проведения проектных расчётов. В связи с этим расчётные методы для данных систем могут иметь лишь оценочный характер. В результате при проведении работ по системам суфлирования ГТД на передний план выдвигаются методы экспериментальных исследований, проводимых как на установках в лабораторных условиях, так и непосредственно в составе двигателя. Именно поэтому при проектировании и доводке систем суфлирования масляных полостей авиационных ГТД в настоящее время доминируют эмпирические подходы.

4. Конструкции суфлёров, применяемых в двигателях

Всё разнообразие приводных центробежных суфлёров (ПЦС) можно свести к двум основным типам: осевым, в которых отделение масла от воздуха происходит при движении воздухомасляной смеси внутри рабочего колеса в осевом направлении, и радиальным, в которых в рабочем колесе масло отделяется от воздуха в потоке воздухомасляной смеси, движущейся в радиальном направлении.

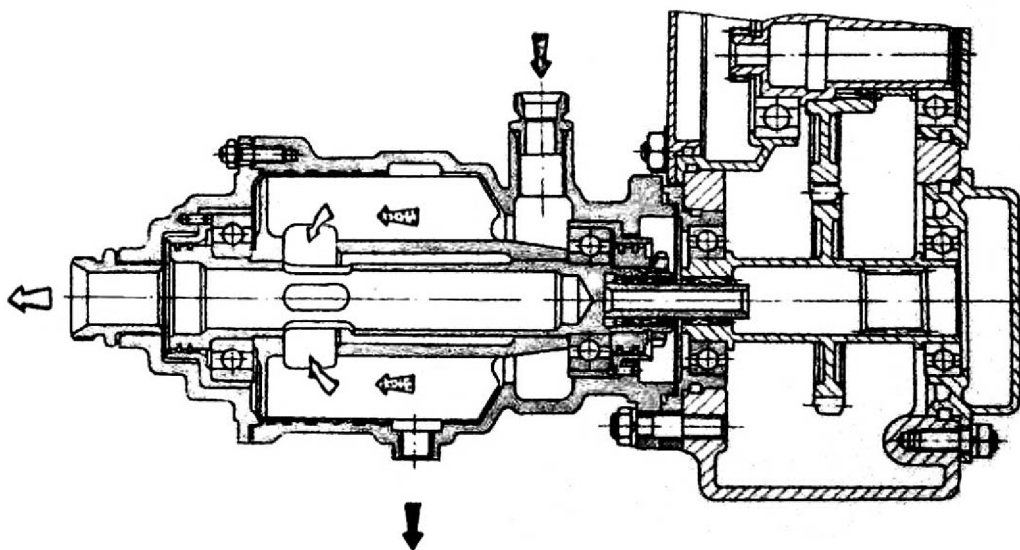


Рис. 4. Суфлёр осевого типа

В осевом суфлере (рис. 4) воздухомасляная смесь поступает в каналы роторного элемента (крыльчатки), расположенные параллельно оси вращения. Крыльчатка вращается в корпусе. Масло под действием центробежных сил отбрасывается на периферию и далее возвращается в циркуляционный контур масляной системы. В полем валу, на котором расположена крыльчатка, имеются отверстия для отвода очищенного воздуха. У осевых суфлёров, по сравнению с суфлёрами радиального типа, сложнее конструкция, однако их применяют на многих отечественных двигателях. Ретроспективный анализ показывает, что распространённость осевых суфлёров была обусловлена стремлением разработчиков ГТД первых поколений использовать в качестве сепарирующего устройства системы суфлирования такой отработанный агрегат масляной системы, как центрифуга. В дальнейшем решающую роль сыграла преимущество в использовании суфлёров осевого типа, т.е. во многих ОКБ имеет место традиционный подход к данному вопросу.

Центробежные суфлёры радиального типа получили широкое распространение в последние четыре десятилетия. Их применяют ведущие зарубежные фирмы («Пратт-Уитни», «Роллс-Ройс» и «Дженерал Электрик»), а в России радиальные суфлёры используют на двигателях ОАО «СНТК им. Н.Д. Кузнецова», Ступинского конструкторского бюро машиностроения и Калужского моторостроительного завода.

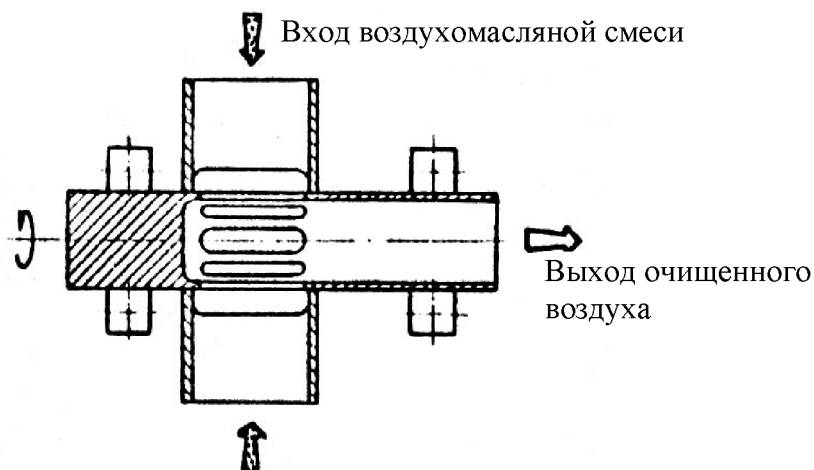


Рис. 5. Схема движения потока в суфлёр радиального типа

При работе радиального суфлёра воздухомасляная смесь поступает в рабочее колесо с периферии (рис. 5). Центробежные силы, накладываемые на поток, препятствуют проникновению частиц масла в центральную область ротора. Радиальные каналы рабочего колеса соединены с внутренней полостью вала, через которую удаляется очищенный от масла воздух.

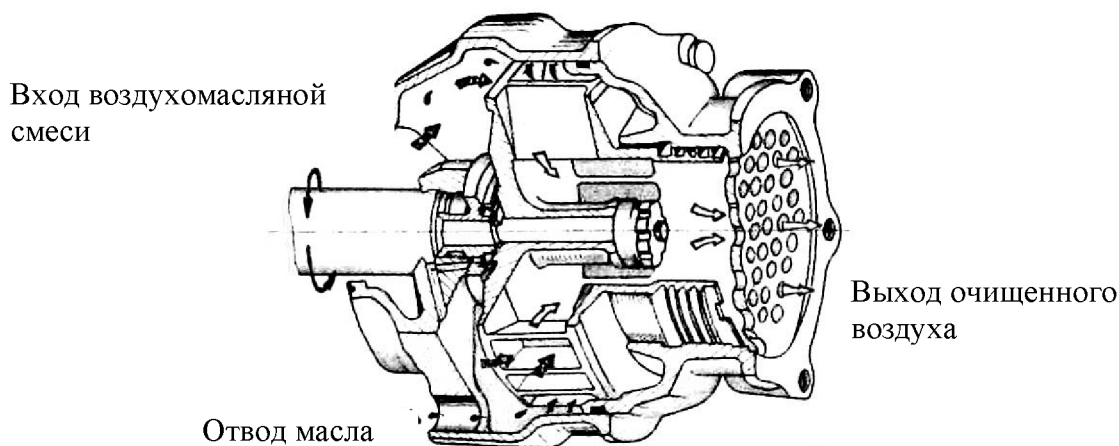


Рис. 6. Суфлёр двигателя "Тайн"

Конструктивное оформление всех известных центробежных суфлёров радиального типа и их приводов существенно различно, и в первую очередь отличия предопределяются местом установки суфлёра в двигателе. Рабочее колесо рассматриваемого типа суфлёра может быть легко скомпоновано не только в специальном корпусе (рис. 6), но также внутри коробки приводов (рис. 7) или в масляной полости опоры ротора двигателя (рис. 8). Причём, благодаря компактности конструкции, суфлёры радиального типа, устанавливаемые в масляной полости опоры ротора, получили более широкое распространение.

Суфлёры радиального типа по сравнению с суфлёрами осевого типа имеют значительно меньшую длину. И с точки зрения обеспечения компактности конструкции двигателя предпочтение следует отдавать суфлёру радиального типа (за исключением тех случаев, когда суфлёр, размещаемый в виде агрегата на коробке приводов, ограничен по диаметальному размеру).

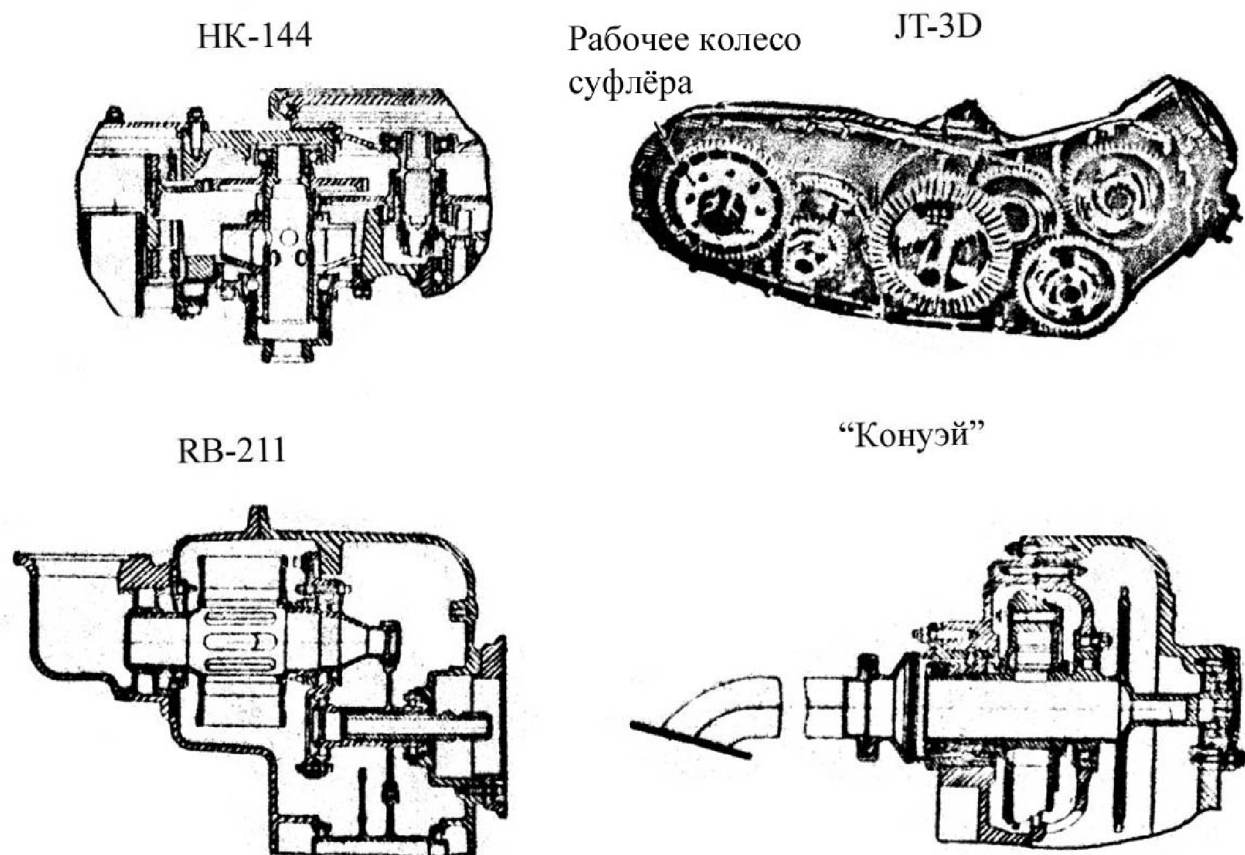


Рис. 7. Установка суфлёра в коробках приводов

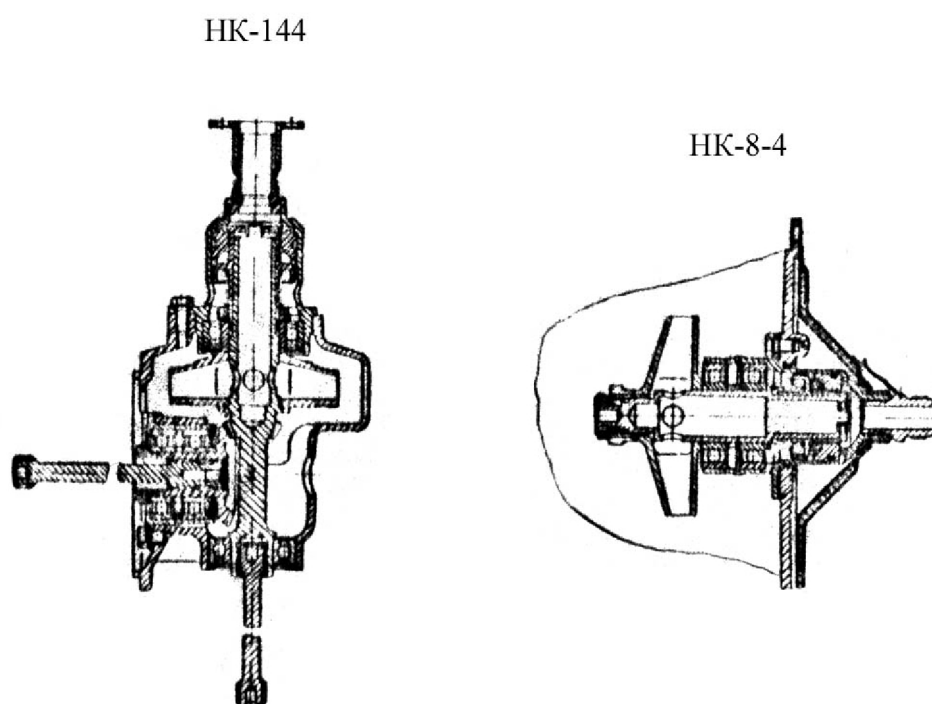


Рис. 8. Суфлёры, устанавливаемые внутри масляных полостей опор

От эффективности суфлёров эксплуатационный расход масла зависит самым непосредственным образом. При этом очевидно, что чем меньше количество воздуха прорывается через уплотнения масляных полостей опор, тем легче осуществить сепарацию воздушно-масляной смеси. Но следует отметить, что расход масла в центробежном суфлёре определя-

ется не только эффективностью сепарации масляного тумана в рабочем колесе, но и герметичностью уплотнения между ротором и статором суфлёра (на выходе воздуха, очищенного от масла). Естественно, что прежде всего должны быть исключены (или по крайней мере сведены к минимуму) утечки масла через указанное уплотнение суфлёра. Принципиально это уплотнение не отличается от подвижных уплотнений, используемых в масляных полостях трансмиссии двигателя. В настоящее время в центробежных суфлёрах радиального типа применяют в основном три типа уплотнений: лабиринтные (с наддувом), разрезные металлические кольца или графитовые полусферические кольца (рис. 9). Задача обеспечения требуемой герметичности уплотнения ротора суфлёра не является принципиально сложной, но она заслуживает должного внимания.

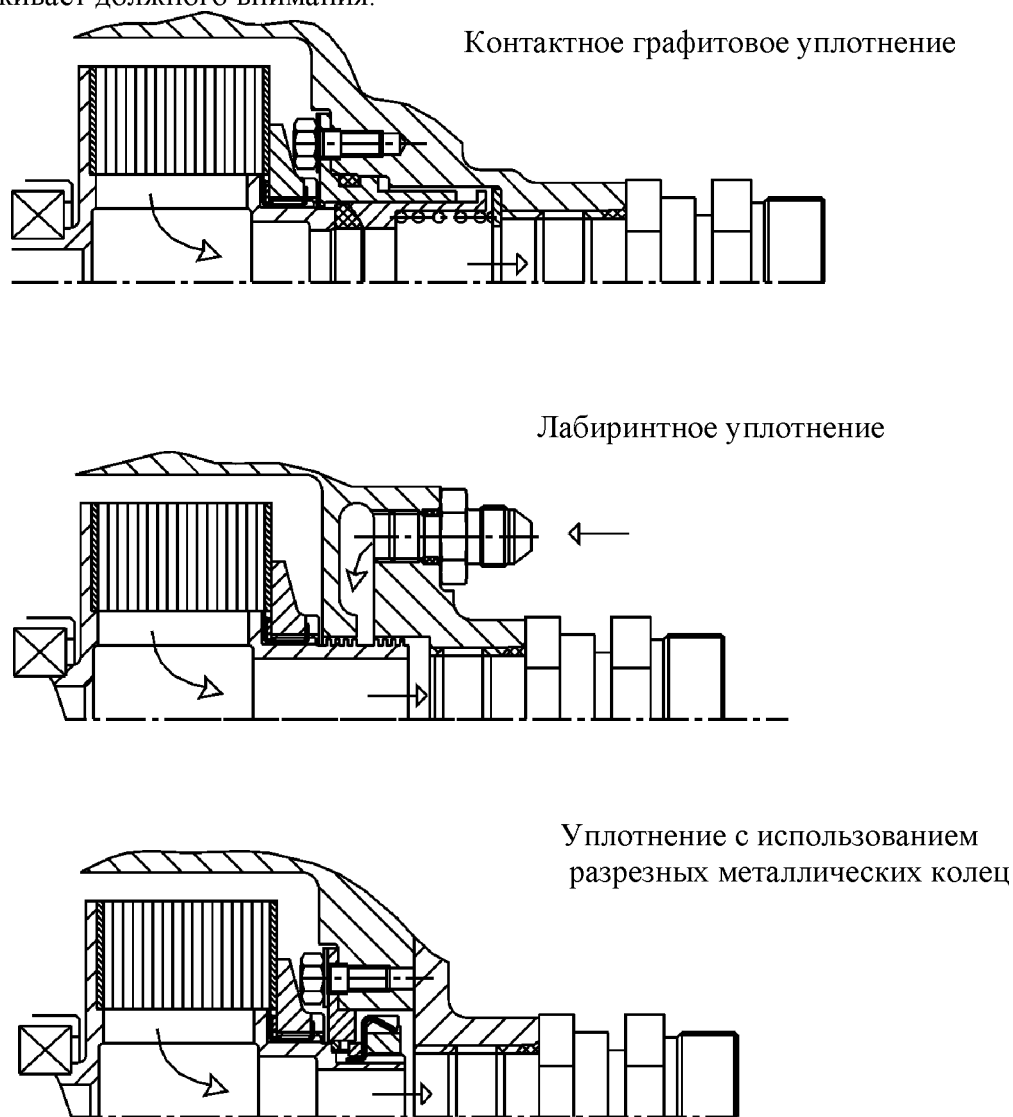


Рис. 9. Возможные варианты конструкции уплотнения вала суфлёра

Таким образом, основным элементом суфлёра, определяющим эффективность его работы, является рабочее колесо. Поэтому важное значение имеет выбор его рациональной геометрии и кинематических параметров, обеспечивающих высокую степень очистки воздуха, удаляемого из системы суфлирования, при работе двигателя на любом режиме.

5. Разновидности рабочих колёс суфлёров радиального типа

Известно много различных видов рабочих колёс приводных центробежных суфлёров. Однако широкое применение нашли те из них, которые, имея высокую сепарирующую способность, отличаются простотой конструкции.

Сепарирующим устройством могут служить даже радиальные каналы в полом валу (рис. 10, а). Однако такой рабочий элемент не обеспечивает удовлетворительной эффективности маслоотделения на низких режимах работы двигателя (а также при запуске и останове), в связи с чем появляется необходимость в конструировании специального рабочего колеса.

Развитием идеи сепарирующих каналов в полом валу является обычное центробежное колесо с радиальными лопатками, совмещённое с полым валом (рис. 10, б). С помощью такого колеса можно обеспечить широкий диапазон окружных и радиальных скоростей на его входе.

Лопатки колеса могут быть установлены под углом к фронту решетки с наклоном в сторону, противоположную вращению (рис. 10, в). При этом колесо с наклонными лопатками улучшает качество сепарации по сравнению с колесом, имеющим чисто радиальные лопатки, за счёт уменьшения максимально необходимого угла поворота колеса для соприкосновения лопаток с частицами масла в процессе движения потока в межлопаточных каналах. Наклонные лопатки могут быть как прямыми, так и профилированными.

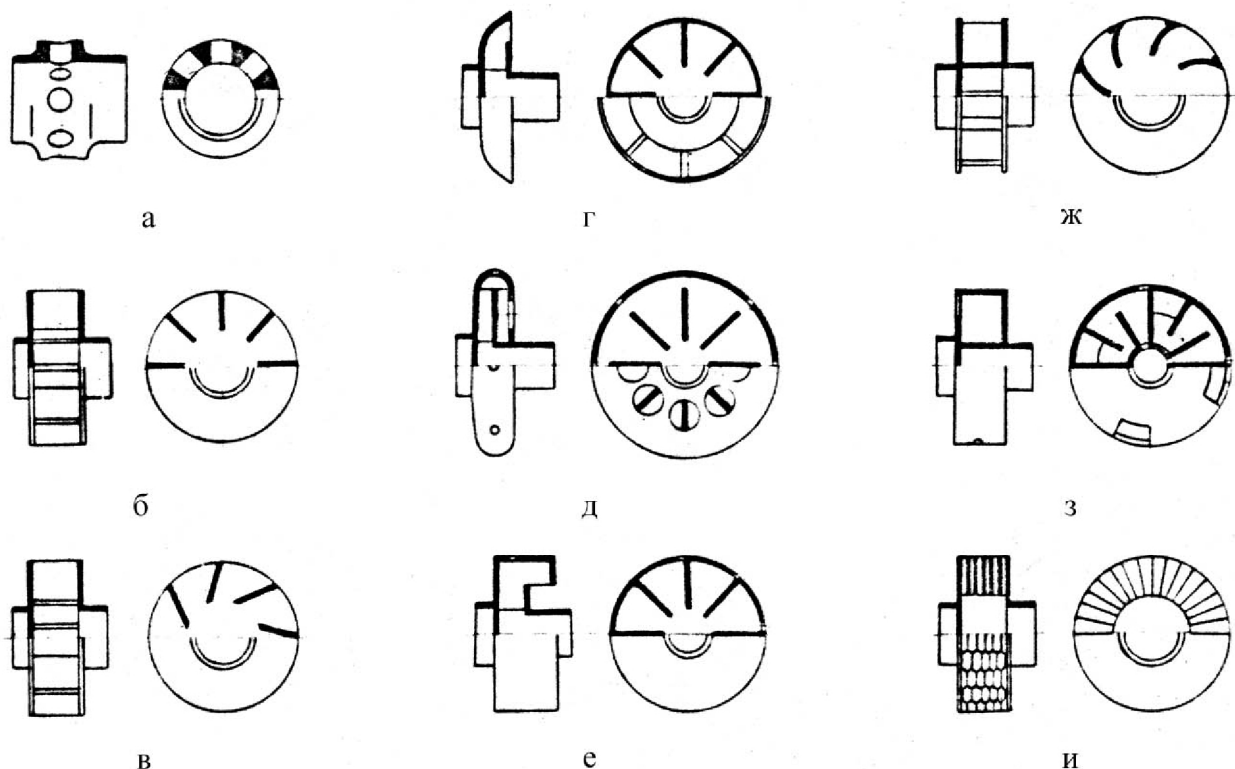


Рис. 10. Возможные виды рабочих колёс радиального типа

В центробежном колесе, показанном на рис. 10, г, осуществлён боковой подвод воздухомасляной смеси к периферийной части межлопаточных каналов.

Усовершенствованием вышерассмотренной формы рабочего колеса является вариант, показанный на рис. 10, д. Поток смеси подаётся сбоку к втулочной части межлопаточных каналов, что снижает относительную скорость потока при входе в решетку колеса. При движении по межлопаточным каналам от втулки к периферии осуществляется наложение на поток поля центробежных сил и разделение фаз, завершающееся в периферийной области колеса разводкой фаз. Масло через отверстия в козырьке под действием центробежных сил отбрасывается в масляную полость, а очищенный от масла воздух по межлопаточным каналам второй части колеса от периферии к центру поступает в полый вал. В этом случае вторая часть колеса используется как дополнительный сепарирующий элемент обычного радиального колеса.

Разновидностью рассмотренного варианта является колесо, показанное на рис. 10, е. Воздухомасляная смесь поступает в решетку колеса в радиальном направлении от центра к периферии. В периферийной области осуществляется разводка разделённых фаз, а далее процесс протекает так же, как и в предыдущем варианте колеса.

Отличительные особенности конструктивных элементов лопатки колеса, показанного на рис. 10, ж, направлены также на предотвращение выброса отделённого масла в поток воздухомасляной смеси, подводимый к колесу. На периферии лопатки по всей ширине её передней поверхности выполнен козырёк с канавкой для сбора и отвода отделённого масла через отверстия в диске в масляную полость, минуя поток входящей в колесо воздухомасляной смеси.

Для повышения качества сепарирования воздухомасляной смеси используют также многоходовые радиальные колёса, подобные изображенному на рис. 10, з. Воздушный поток, проходя последовательно ряд радиальных каналов и перемещаясь попеременно от периферии к центру и от центра к периферии, поступает в полый вал. Подобные колёса имеют увеличенную протяжённость каналов при сокращённых радиальных габаритах. Однако для достижения приемлемого гидравлического сопротивления у такого колеса должен быть увеличен осевой габаритный размер.

В настоящее время на изделиях ОАО «СНТК им. Н.Д. Кузнецова» применяют рабочее колесо суфлёра с сотовой решеткой вместо лопаточной (рис. 10, и). Гидравлический тракт этого колеса выполнен в виде большого числа радиальных каналов с тонкостенными перемычками. Большая относительная длина радиальных каналов сводит к минимуму объём полости гидравлического тракта, занимаемой зоной вихревых течений, что способствует лучшему наложению на поток поля центробежных сил. Кроме того, колесо сотовой конструкции имеет довольно развитую поверхность, способствующую более эффективному отделению масла из потока за счёт прилипания капель масла к стенкам каналов.

Конструктивное оформление рабочих колёс суфлёров, применяемых в авиационных двигателях, показано на рис. 11.

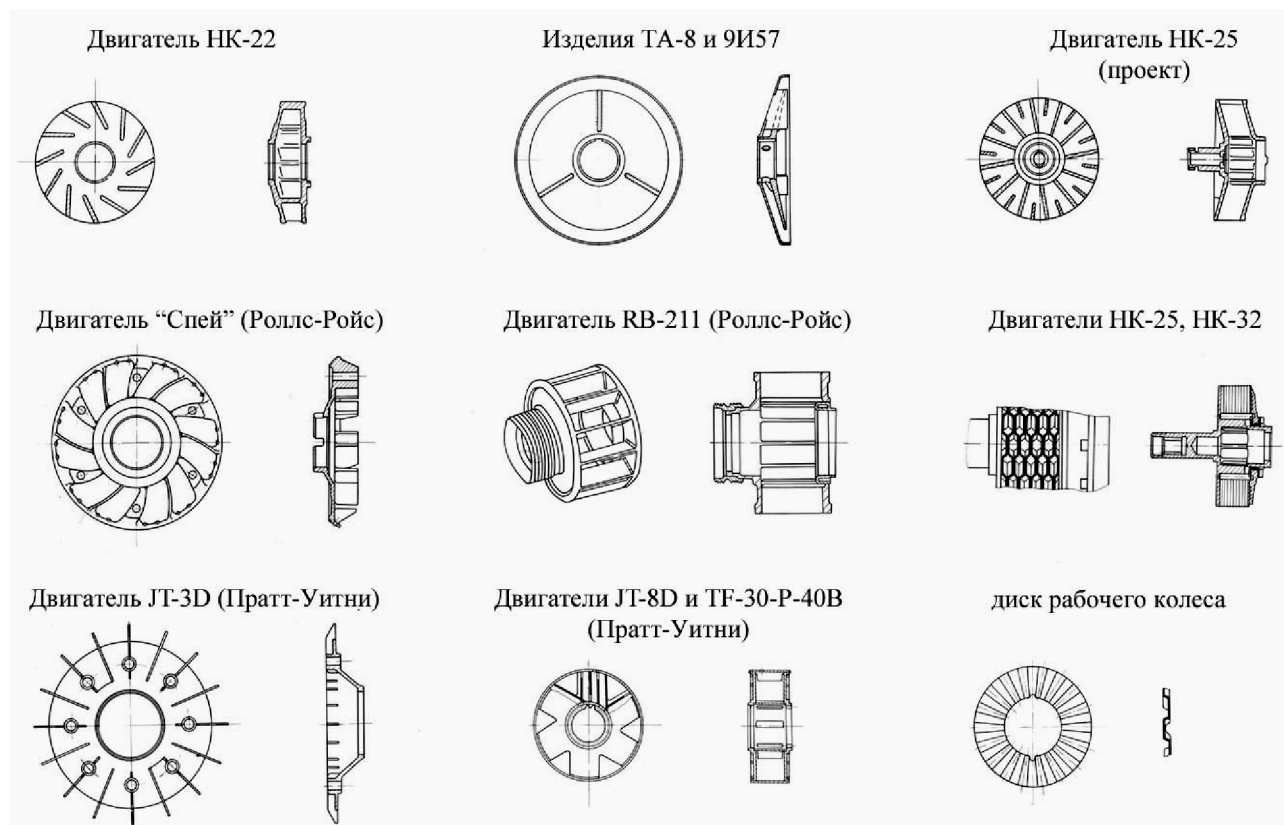


Рис. 11. Конструкции применяемых рабочих колёс

Из приведённых форм рабочих колёс суфлёров радиального типа наибольшее распространение получили обычные колёса с прямыми лопатками (рис. 10, б и рис. 10, в). Они применяются на многих двигателях (J-75, RB-211, CF-6-50, НК-8-2У, НК-8-4, НК-22, НК-144 и НК-86), т.е. прошли большую практическую проверку, показав хорошие результаты по эффективности сепарации воздухомасляных смесей в системах суфлирования ГТД. Следует также учесть, что такие колёса технологичны и отличаются умеренным гидравлическим сопротивлением.

Рабочие колёса с прямыми лопатками, применяемые на двигателях, имеют либо постоянную ширину канала, либо заужены к периферии. Анализ показывает, что предпочтительнее выполнять канал с постоянной шириной, так как он обеспечивает снижение скорости потока на входе в колесо (при прочих равных условиях), что приводит к улучшению маслоотделения.

Следует также отметить, что для колеса с прямыми лопатками, имеющего постоянную ширину канала, легко может быть составлена упрощённая модель маслоотделения, базирующаяся на достаточно точном представлении о кинематике потока в его гидравлическом тракте.

В связи с этими обстоятельствами все теоретические и экспериментальные исследования в качестве первого этапа изучения особенностей работы суфлёров радиального типа в ОАО «СНТК им. Н.Д.Кузнецова» были проведены применительно к рабочим колёсам указанной формы (рис. 12). Прежде всего, преследовалась цель выяснить, сколь высокой сепарирующей способностью обладает рабочее колесо простейшей формы, с тем чтобы в случае необходимости перейти к исследованию эффективности более сложных по конструкции колёс, что необходимо для решения главной задачи – обеспечения минимальных потерь неотсепарированного масла в системе суфлирования.

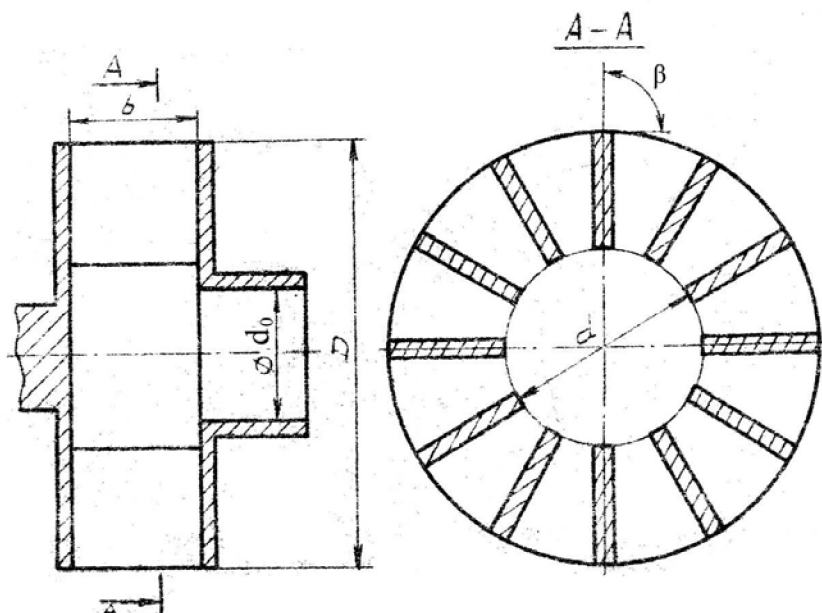


Рис. 12. Исследуемое рабочее колесо

При теоретическом анализе работы колеса суфлёра ставятся задачи выяснения сущности процесса маслоотделения, выявления основных факторов, влияющих на эффективность сепарации в рабочем колесе, установления соответствующих аналитических зависимостей и определения условий полного маслоотделения в выбранном объекте исследования. Так как эти задачи не могут иметь точного решения, пригодного для практического использования, то на первой стадии проведения соответствующих исследований особую важность приобретает полуэмпирический подход к изучению указанных вопросов.

Маслоотделение в рабочем колесе суфлёра представляет собой сложный физический процесс. Воздухomasляная смесь поступает из периферийной зоны во вращающееся рабочее колесо, и при движении потока в межлопаточных каналах происходит частичное или полное разделение фаз: воздух, очищенный от масла, выходит в центральную зону колеса, а отделённое масло центробежными силами выбрасывается из колеса через его входное сечение.

О кинематике потока в круговой лопаточной решётке рабочего колеса даёт представление рис. 13.

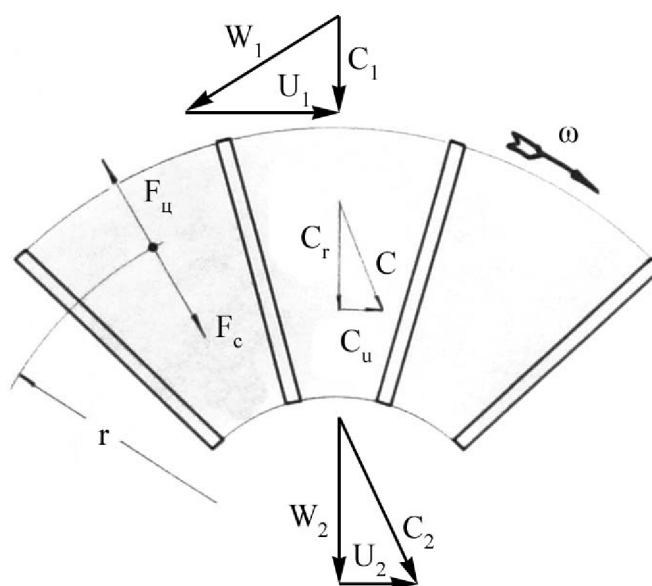


Рис. 13. Кинематика потока в каналах колеса

Очевидно, что эффективность сепарации воздухomasляной смеси в сумме будет определяться поведением всех капель масла. При наложении вращения на движущуюся внутри

колеса смесь каждая капля масла находится под действием комплекса сил. Обладая по сравнению с воздухом большей инерционностью, капли при течении потока в межлопаточном канале будут иметь существенное поперечное смещение и, достигнув стенки, могут прилипнуть к ней (при высоких угловых скоростях происходит частичное отражение и дробление капель, а многие из них могут повторно столкнуться со стенкой и прилипнуть к ней). Вследствие этого вдоль стенок лопаток под действием центробежных сил на периферию будет непрерывно стекать плёнка прилипающего к ним масла.

Следует отметить, что рабочие режимы рассматриваемого колеса соответствуют, как правило, обтеканию лопаточной решётки с большими углами атаки, для которого характерно образование отрывных зон в межлопаточных каналах. При этом возможны две принципиально отличных схемы течения: первая соответствует случаю замкнутой зоны срыва в области межлопаточного канала (рис. 14, а), а вторая – с проникновением зоны срыва на выход (рис. 14, б). Образование в межлопаточных каналах зон вихревых течений, несомненно, оказывает влияние на эффективность маслоотделения лопаточным колесом. Это влияние проявляется, однако, не только из-за изменения скорости потока при загромождении межлопаточного канала зоной отрывных течений. Зона отрыва потока, состоящая из вихревых течений воздухомасляной смеси, способна сама создавать местные поля центробежных сил, осуществляющих сепарацию, носящую хаотический, неустойчивый по направлению характер. Вихревые течения смеси приводят к резкому изменению дисперсии и способствуют образованию масляных жгутов, способных проникать за счёт инерционных сил на выход колеса.

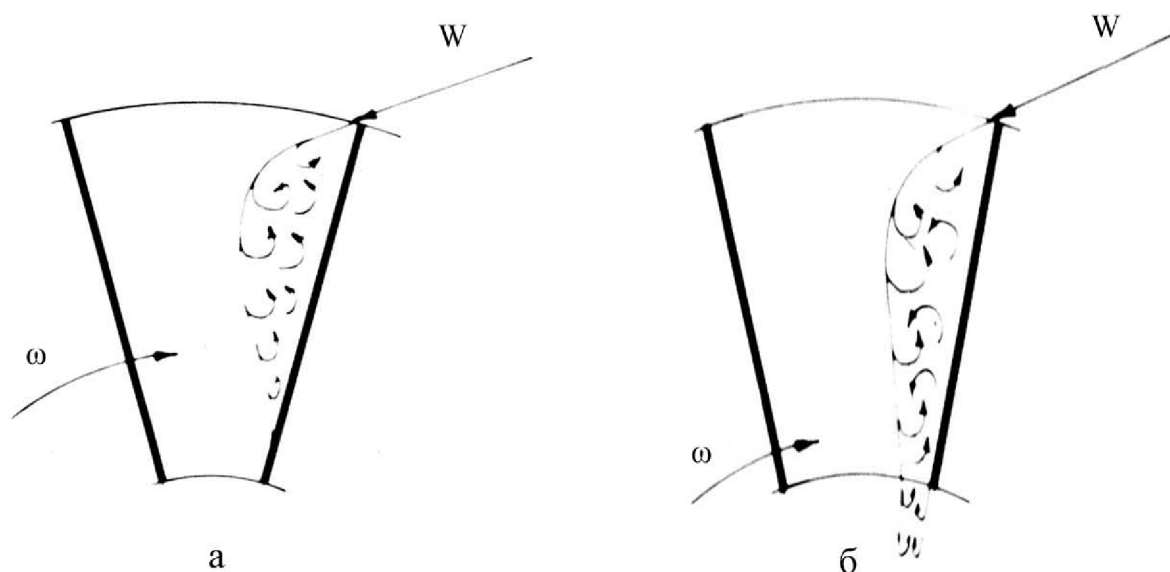


Рис. 14. Схемы течения в межлопаточном канале

Таким образом, подводя итог, необходимо отметить, что количество неотделённого в рабочем колесе масла будет складываться из мельчайших капель, уносимых транзитным потоком от входного сечения до выходного, из части капель, отражённых в поток от стенок, и из доли масла, вынесенного через выходное сечение лопаточной решетки из вихревых зон.

6. Методика экспериментальной проверки эффективности рабочих колёс суфлёров

Опыт проектирования и доводки суфлёров двигателей «НК» показал, что процессы сепарации воздухомасляной смеси в рабочем колесе не поддаются расчёту с достаточной степенью точности. Причём это связано не только с достаточной степенью точности разработки математической модели движения двухфазного потока в межлопаточных каналах рабочего колеса суфлёра, но главным образом с отсутствием в литературе справочных данных по теплофизическим, гидравлическим и акустическим свойствам воздухомасляных смесей. Поэтому при выборе геометрических размеров рабочих колёс суфлёров используют полуэмпирические методы, в основу которых заложены результаты экспериментальных исследований.

В ОАО «СНТК им. Н. Д. Кузнецова» был создан стенд для проведения испытаний суфлёров с целью исследования влияния режимных параметров и формы проточной части рабочего колеса суфлёра на эффективность маслоотделения [2].

Стендовое оборудование, назначение которого заключалось в обеспечении возможных рабочих условий, включало следующие основные узлы и системы:

- привод, обеспечивающий возможность двустороннего вращения колеса;
- стационарный корпус суфлёра (названный «установка»), в который поочерёдно устанавливали сменные рабочие колёса, являющиеся объектом исследований;
- масляный бак с подогревателем и автоматическим терморегулированием;
- воздушную систему с подогревателем и автоматическим терморегулированием;
- воздухомасляный смеситель с устройством для распыла масла;
- статический сепаратор (бак-циклон);
- систему трубопроводов с нагнетающим и откачивающим насосами, фильтрами, клапанами, вентилями и т.д.;
- систему измерения и регулирования уровня параметров;
- систему дистанционного управления с пульта.

Как известно, в тех случаях, когда динамический суфлёр не удаётся разместить внутри коробки приводов, а габариты полостей опор или их конструктивная схема не позволяет расположить суфлёр в одной из них, последний выполняют в виде выносного агрегата, установленного на коробке приводов. При выносе динамического суфлёра его корпус соединяют с суфлируемыми полостями каналами, по которым воздухомасляная эмульсия поступает в полость корпуса агрегата. Именно такая схема, удобная для получения интересующих параметров в широком диапазоне, была принята при проведении экспериментальных работ.

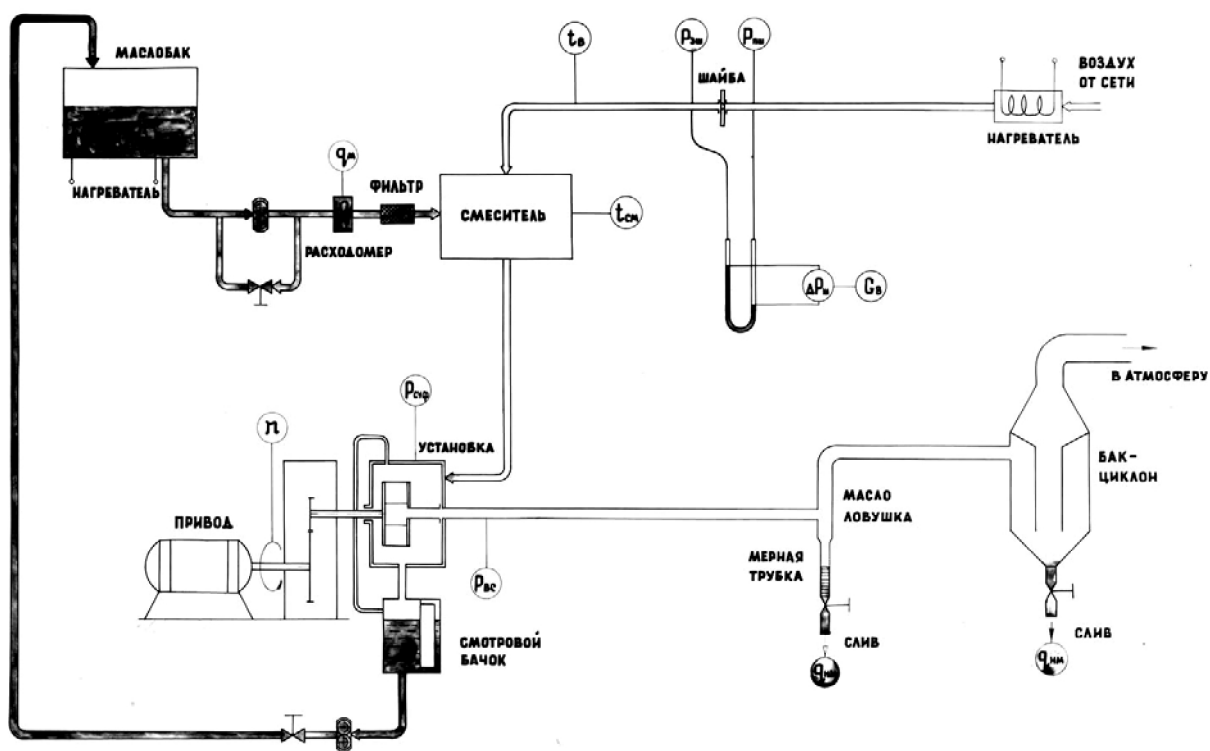
Принципиальная схема стенда для испытаний центробежного суфлёра радиального типа со сменными рабочими колёсами показана на рис. 15.

Стенд имеет замкнутый масляный и разомкнутый воздушный контуры. Масло из бака и воздух из системы с заданной температурой через двухкомпонентные газожидкостные форсунки поступают в смеситель, а далее в полость исследуемого суфлёра. Из внутренней полости корпуса суфлёра отделённое масло через сливной канал насосом откачивается в бак, а воздух через межлопаточные каналы рабочего колеса, полый вал, магистраль отвода с масляной ловушкой и бак-циклон выпускается в атмосферу.

Созданный стенд располагал следующими возможностями:

- привод стенда обеспечивал возможность вращения ротора в диапазоне от 500 до 12000 об/мин (мощность привода до 5 кВт);

- при проведении экспериментов изменяли прокачку масла через форсунки смесителя от 0 до 0,1 л/с и расход воздуха – от 0 до 70 г/с, создавая воздухомасляную смесь..



- количества воздуха и масла, поступающих в смеситель;
- температур воздуха и поступающей в колесо смеси;
- давления смеси в корпусе установки;
- частоты вращения ротора;
- расхода неотделённого масла;
- давления воздуха на выходе из колеса.

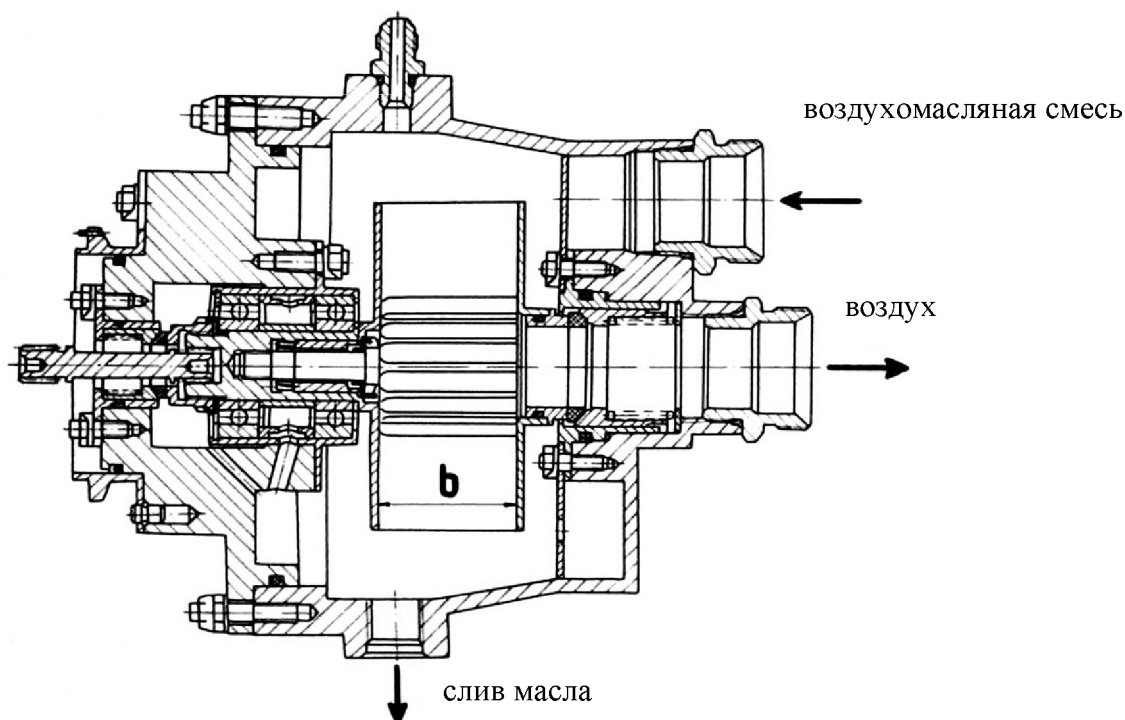


Рис. 16. Установка для экспериментальных исследований колёс выносного суфлёра

Для удобства сравнения первичных результатов испытаний по определению эффективности сепарации воздухомасляной смеси и гидравлического сопротивления каждое рабочее колесо испытывали по типовой программе, которая включала следующие режимы:

- количество подаваемого в смеситель воздуха: 10, 20, 30, 40, 50, 60 и 70 г/с;
- объёмное количество подаваемого в смеситель масла : 0,05 и 0,1 л/с;
- частота вращения ротора: 1000, 2000, 3000, 5000, 7000, 9000 и 12000 об/мин.

На всех режимах автоматически поддерживали постоянную температуру: воздуха $t=100\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ и воздухомасляной смеси $t=90\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Все испытания были проведены на масле МК-8.

При запуске стенда и выходе на первый установившийся режим до начала измерений производили выдержку на этом режиме в течение 5 минут для стабилизации расхода неотделённого масла и достижения равновесного режима течения двухфазной воздухомасляной смеси в подводящей и отводящей магистралях стенда. Такую же выдержку на установившемся режиме в течение 3 минут производили после перехода на каждый новый режим. Минимальное время необходимой выдержки для стабилизации измеряемых параметров было определено при отладке и технологических пусках.

Для устранения возможности ошибочных измерений количества неотделённого масла при нарушении работы торцового уплотнения в процессе испытания, в конце испытаний на разных режимах по частоте вращения производили контрольное повторение измерений на исходном режиме. Достоверность результатов измерений в процессе испытаний подтверждалась их совпадением при контрольных замерах.

7. Отраслевой стандарт на рабочие колёса суфлёров радиального типа

Поскольку суфлёры радиального типа нашли применение во всех ТРДД, созданных под руководством Генерального конструктора Н.Д. Кузнецова, то этому ОКБ было поручено разработать отраслевой стандарт на рабочие колёса таких суфлёров.

Ниже приведены материалы, положенные в основу разработки ОСТ на рабочие колёса суфлёров радиального типа [2].

В результате проведения анализа конструктивных особенностей рабочих колёс суфлёров радиального типа, используемых в ГТД, с учётом требования технологичности их конструкции, а также на основании предварительных испытаний был сделан вывод о целесообразности применения колёс с прямыми лопатками и постоянной шириной канала. При этом оптимальным является число лопаток, равное 12 (колёса с меньшим количеством лопаток имеют более низкую сепарирующую способность, а при большем числе лопаток резко увеличивается гидравлическое сопротивление рабочего колеса, вследствие заужения проходных сечений в межлопаточных каналах в зоне выходного диаметра лопаточной решётки).

7.1. Факторы, влияющие на сепарирующую способность суфлёра

На основании проведённых испытаний и теоретического анализа были выявлены основные факторы, оказывающие влияние на сепарирующую способность и на гидравлическое сопротивление рабочего колеса суфлёра радиального типа с прямыми лопатками. Экспериментальными исследованиями серии колёс преследовалась цель определения качественного и количественного влияния каждого фактора в отдельности при фиксированных значениях остальных. Были исследованы колёса с диаметрами (D) от 60 до 120 мм, каналами шириной (b) от 10 до 50 мм, углами установки лопаток (β) в диапазоне от 70 до 110° при частоте вращения (n) от 1000 до 12000 об/мин и при различных значениях расхода воздуха (G) от 40 до 70 г/с и объёмной подаче масла (q_m) от 0,05 до 0,1 л/с. Условное обозначение размеров показано на рис. 12..

7.1.1. Влияние частоты вращения

Частота вращения колеса при определённой его геометрии и заданном расходе воздухомасляной смеси является параметром, определяющим кинематику потока. Типичная зависимость маслоотделения от числа оборотов представлена на рис. 17 для радиального рабочего колеса диаметром 100 мм и шириной 30 мм. Зависимость дана для нескольких значений расхода воздухомасляной смеси, проходящей через колесо. Как видно, для каждого значения расхода в зоне больших чисел оборотов количество неотделённого масла практически остаётся постоянным и только при уменьшении числа оборотов до определённой величины наблюдается интенсивное увеличение количества неотделённого масла, т.е. более чётко вырабатывается граница резкого ухудшения маслоотделения.

На рассматриваемом рисунке использованы следующие условные обозначения:

$q_{н.м.}$ – количество неотделённого масла;

q_m – количество масла, распылённого в воздухе, поступающем в рабочее колесо, л/с;

G – расход воздуха, поступающего в рабочее колесо суфлёра, г/с;

D – наружный диаметр рабочего колеса, мм;

b – ширина рабочего колеса, мм;

n – частота вращения рабочего колеса, об/мин.

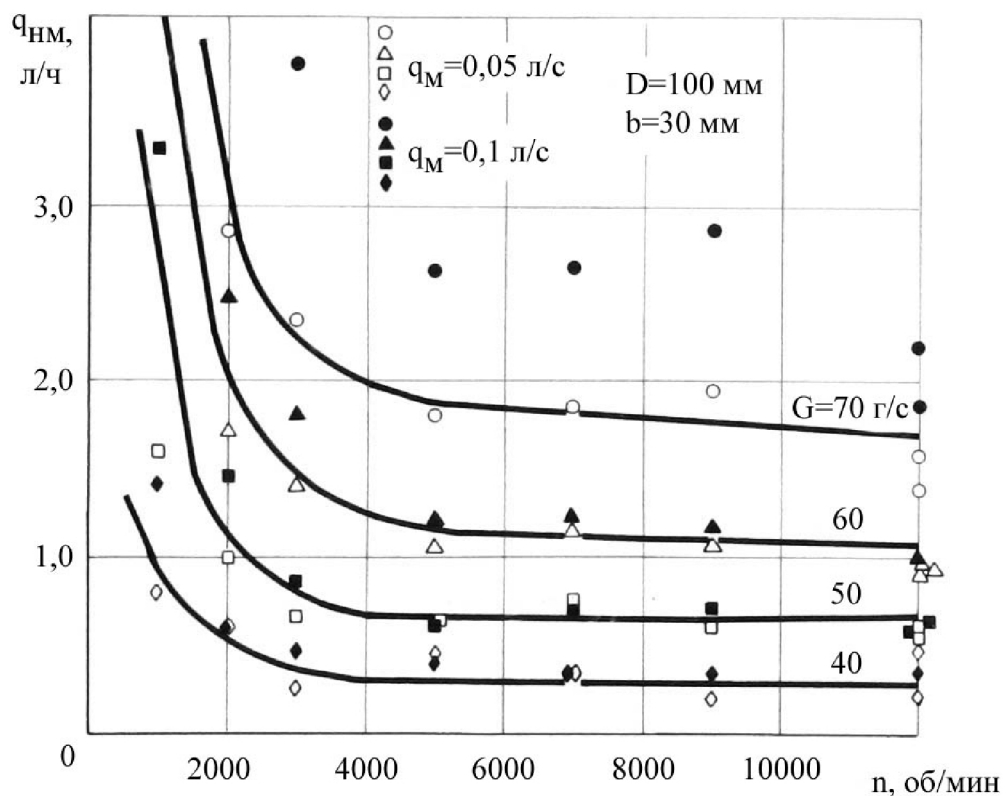


Рис. 17. Зависимость количества неотделённого масла от режима работы

По мере увеличения расхода смеси эта граница смещается в зону больших чисел оборотов. Граница ухудшения сепарирующей способности суфлёра более чётко просматривается для режимов и колёс, обеспечивающих маслоотделение в пределах до 1,5 л/ч. Для колёс и режимов с худшим маслоотделением граница имеет менее выраженный характер по частоте вращения.

7.1.2. Влияние наружного диаметра

Влияние наружного диаметра на эффективность сепарации проверяли на рабочих колёсах с пятью значениями их ширины. Изменение диаметра осуществляли путём подрезки наружного диаметра $D = 120$ мм, последовательно, до значений $D = 100, 80$ и 60 мм.

Изменение наружного диаметра при постоянстве режимных параметров вносит существенные изменения в кинематику потока особенно на входе в колесо. Так, одновременное уменьшение окружной скорости и площади входа в колесо, связанное с уменьшением его наружного диаметра, существенно уменьшает угол атаки, что благоприятно сказывается на обтекании лопаток и уменьшении срывных вихревых зон в межлопаточных каналах. Таким образом, при уменьшении наружного диаметра колеса уменьшение окружной скорости и увеличение радиальной (способствующие ухудшению маслоотделения) действуют одновременно с другим фактором (уменьшение угла атаки), который улучшает маслоотделение. Естественно, что общий эффект будет определяться количественным и качественным влиянием каждого фактора в диапазоне изменения кинематических параметров.

Одновременное влияние двух указанных выше факторов является причиной относительно небольшого ухудшения маслоотделения при уменьшении наружного диаметра колеса, что наглядно видно по результатам испытаний, представленным на рис. 18 для колеса шириной 50 мм.

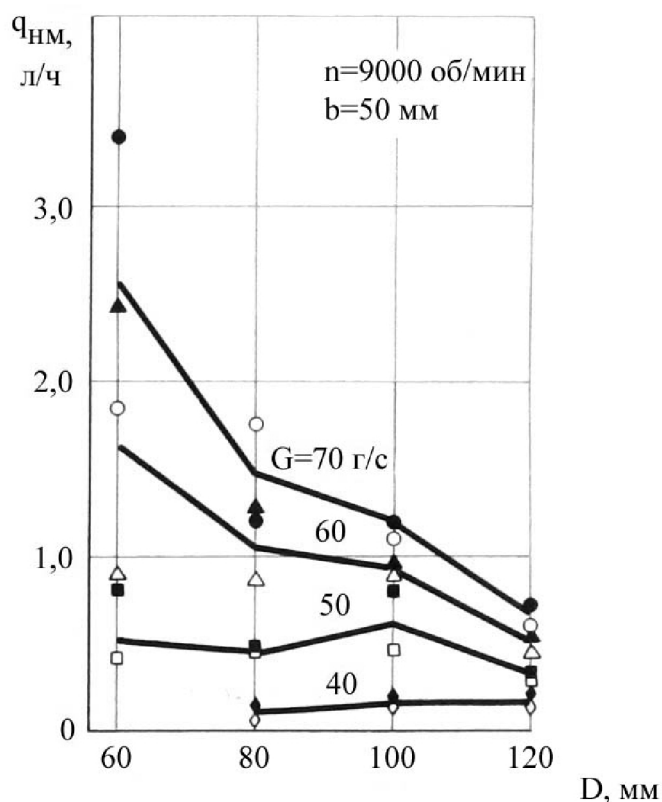


Рис. 18. Влияние наружного диаметра колеса на маслоотделение

7.1.3. Влияние ширины колеса

Влияние ширины рабочего колеса на эффективность маслоотделения была проверена на колёсах с четырьмя численными значениями наружных диаметров: 120, 100, 80 и 60 мм в диапазоне их ширины от 10 до 50 мм (через каждые 10 мм). Характерное влияние ширины колеса на эффективность маслоотделения показано на рис. 19 на примере колеса с наружным диаметром 100 мм.

Анализируя приведённые зависимости, можно также отметить общую тенденцию к более резкому росту количества неотделённого масла с уменьшением ширины колеса при величинах, превышающих 1,5 л/ч. Как и в случае изменения наружного диаметра, при изменении ширины колеса чётко проявляется влияние двух факторов: величины радиальной входной скорости и угла атаки на входе в колесо потока воздухомасляной смеси.

Теоретически следует ожидать, что в случае равномерного потока на входе в межлопаточные каналы при увеличении ширины колеса и пропорциональном увеличении расхода воздухомасляной смеси кинематика потока в радиальном сечении должна сохраняться, а количество неотделённого масла должно быть пропорциональным расходу. Однако в экспериментах было выявлено отсутствие такой пропорциональности. На рис. 20 в качестве примера для нескольких испытанных колёс, имеющих одинаковый наружный (и внутренний) диаметр, но различную ширину канала, представлена зависимость количества неотделённого масла от абсолютной скорости потока на входе в колесо. Эта зависимость получена при испытаниях колёс диаметром 120 мм и шириной 50, 40, 30, 20 и 10 мм на частоте вращения 9000 об/мин и различных расходах. Диапазон изменения ширины колёс и расходов смеси позволил на этих колёсах получить одинаковую скорость потока при различной ширине, т.е. обеспечить одинаковую кинематику потока.

Анализ приведённых на рис. 20 результатов испытаний показал чёткое расслоение зависимости количества неотделённого масла от скорости потока на входе для колеса различной ширины. Таким образом, было установлено, что при одной и той же величине входной

скорости потока колесо меньшей ширины обеспечивает более эффективную сепарацию воздухомасляной смеси.

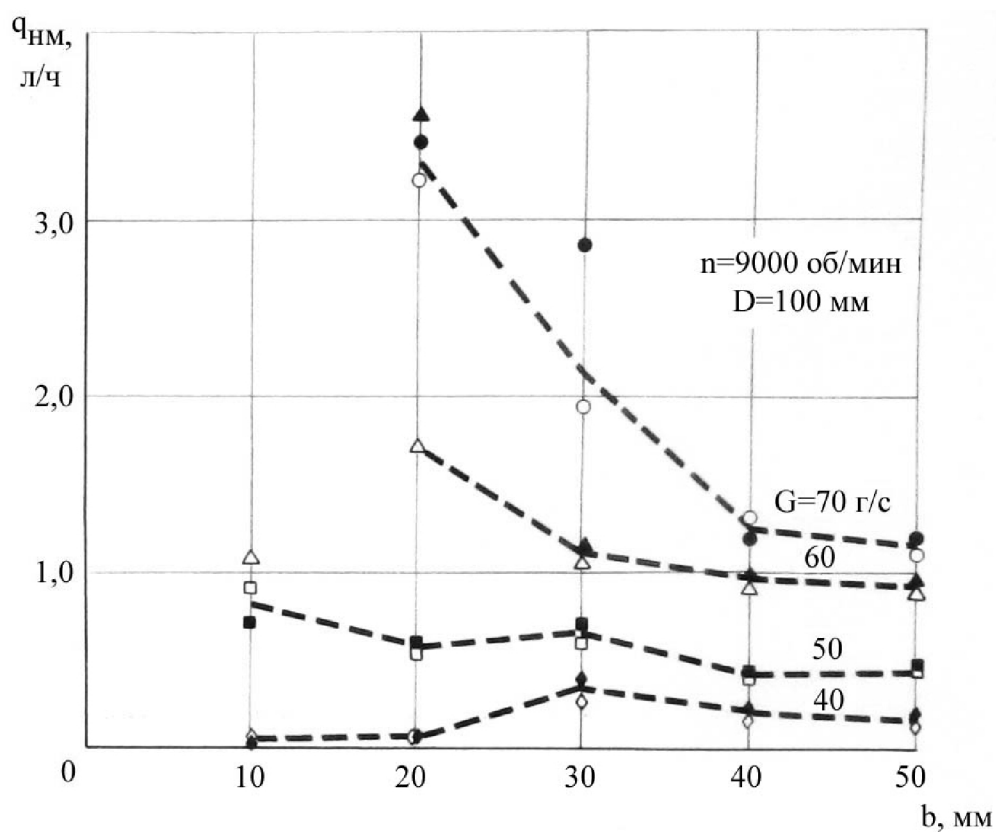


Рис. 19. Зависимость количества неотделённого масла от ширины колеса

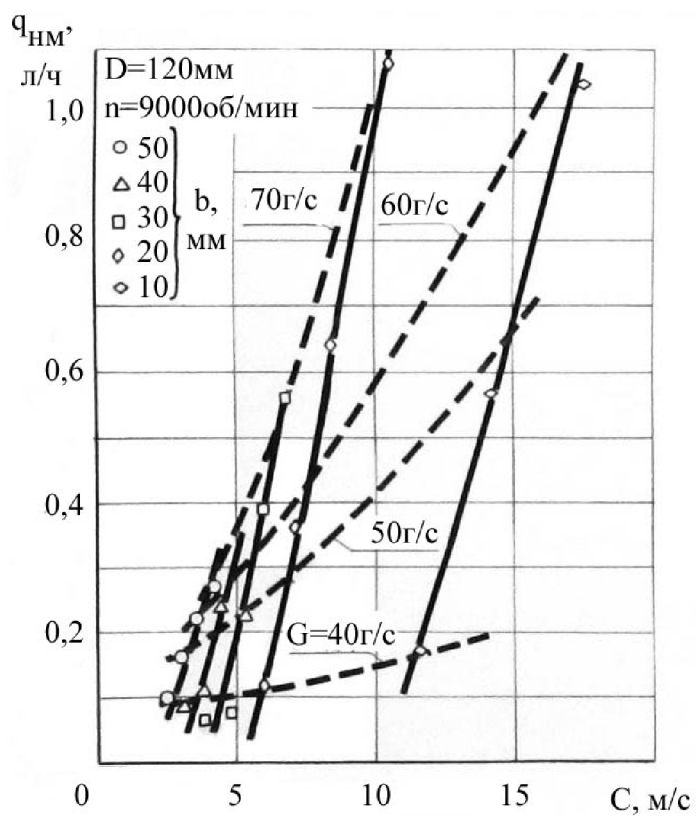


Рис. 20. Влияние абсолютной скорости потока на входе в рабочее колесо

7.1.4. Влияние угла установки лопатки

Влияние угла установки лопатки при входе было проверено на колесе с наружным диаметром 100 мм и шириной 30 мм при пяти значениях углов к фронту решетки: 70, 80, 90, 100 и 110°. Данные значения соответствуют диапазону углов лопаток, загнутых от 20° по вращению и до 20° против вращения. Изменение угла установки, оказывающее влияние на геометрию проточной части колеса, сказывается прежде всего на кинематике потока, а через последнюю - на эффективности маслоотделения.

Результаты экспериментальных исследований (в оговорённом диапазоне углов установки лопаток на входе) для одного из колёс при постоянном расходе воздухомасляной смеси приведены на рис. 21 в виде зависимостей количества неотделённого масла от величины указанного угла при различных оборотах ротора. Из приведённых результатов видно, что имеется оптимум эффективности маслоотделения в области углов установки лопаток несколько загнутых назад, т.е. меньших 90°.

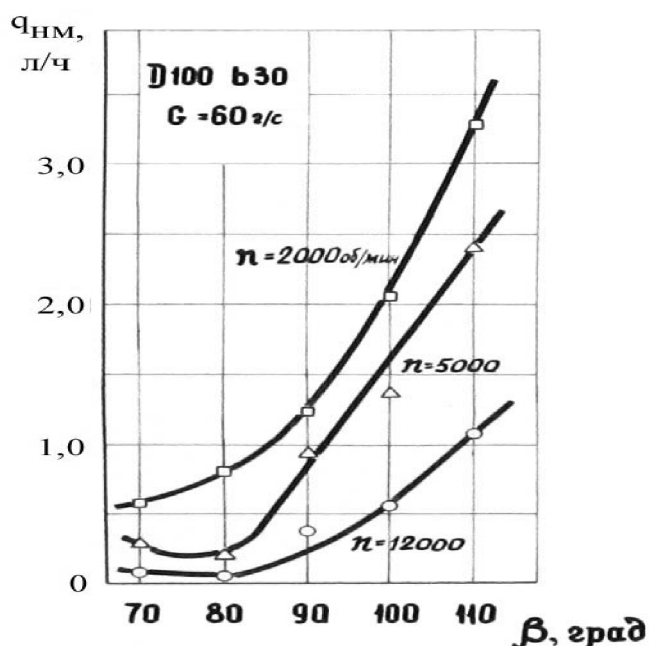


Рис. 21. Влияние угла установки лопатки на входе в колесо на маслоотделение

7.1.5. Гидравлическое сопротивление колеса

Зависимость гидравлического сопротивления рабочего колеса диаметром 120 мм и шириной 50 мм от расхода смеси при различных частотах вращения представлена на рис. 22. С увеличением частоты вращения гидравлическое сопротивление возрастает. С увеличением расхода воздухомасляной смеси гидравлическое сопротивление рабочего колеса также увеличивается. Однако в целом уровень потерь давления в рабочем колесе суфлёра даже при высоких оборотах привода сравнительно невелик. Показанный в качестве примера вид гидравлических характеристик качественно справедлив для всех исследованных рабочих колёс.

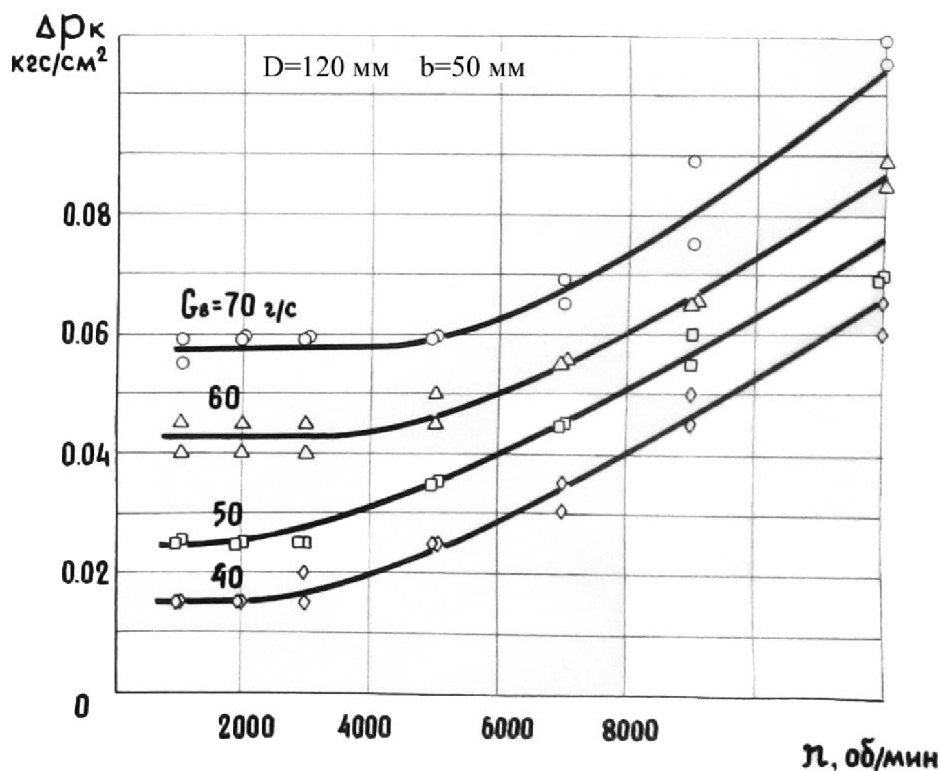


Рис. 22. Зависимость гидравлического сопротивления от расхода смеси и оборотов колеса

7.2 Обобщение результатов экспериментальных исследований

На основании результатов проведённых на предприятии исследований и экспериментов был выпущен отраслевой стандарт, устанавливающий основные параметры и технические требования на разрабатываемые колёса приводных центробежных суфлёров радиального типа [3].

Стандарт устанавливает два типа колёс. Колёса с радиальными лопатками соответствуют типу 1, с наклонными – типу 2.

Основные параметры колёс должны соответствовать указанным в табл. 1.

. Основные параметры колёс с радиальными лопатками Таблица 1

Наименование параметра	Тип					
	1			2		
	типоразмер					
	1	2	3	1	2	3
Максимальный расход воздухомасляной смеси, л/с	10	20	30	40	50	60
Максимальное гидравлическое сопротивление, Па*10 ⁻³	5			8	12	18
Диапазон рабочих оборотов, об/мин	2000-12000					3000-12000
Максимальное количество неотсепарированного масла, л/ч	0,1					

Основные размеры колёс типа 1 (рис. 20) и типа 2 (рис. 21) должны соответствовать указанным в табл.2.

Основные размеры колёс Таблица 2.

Тип	Типоразмер	D	d	b
1	1	60	40	10
	2			30
	3	80		
2	1	100	50	40
	2			
	3	120	60	

Проточная часть колеса должна быть образована двенадцатью одинаковыми равномерно расположенными по окружности плоскими лопатками круговой решётки, по ширине ограниченной дисками, перпендикулярными оси решётки.

Колесо может быть установлено в масляной полости опоры, коробки приводов или в индивидуальном корпусе.

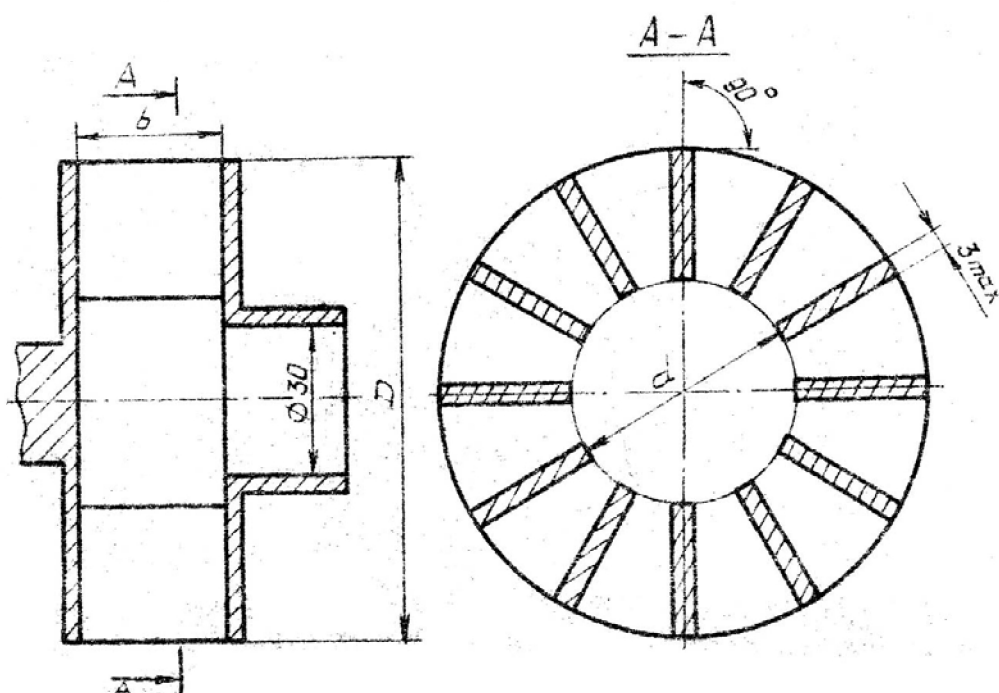


Рис. 23. Колесо с радиальными лопатками

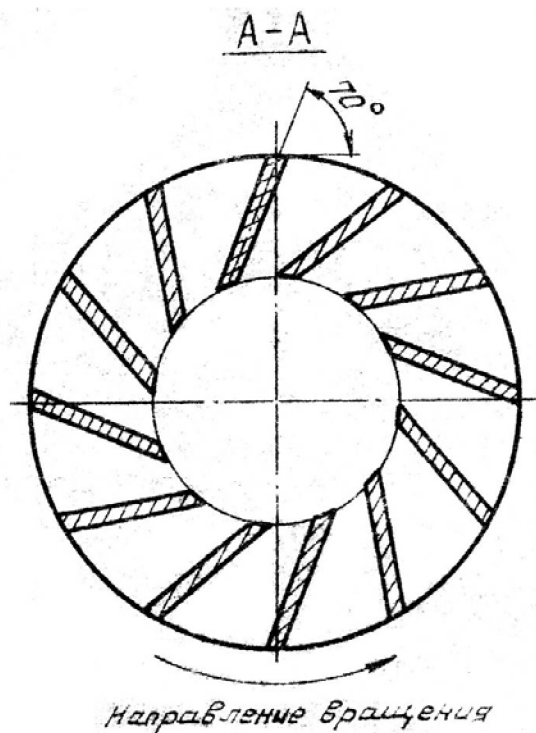


Рис. 24. Колесо с наклонными лопатками

Уместно отметить, что отраслевой стандарт на рабочие колёса суфлёров осевого типа [4] был разработан в МАИ под руководством Г.С. Скубачевского (см. приложение).

8. Рабочие колёса с повышенной эффективностью

С целью улучшения маслоотделения в системе суфлирования допускается, в отличие от стандарта, применять рабочие колёса суфлёров с усложнённой геометрией их каналов.

8.1 Сотовое рабочее колесо

В изобретении [5] предложена конструкция сотового рабочего колеса. Такое колесо выполнено из набора гофрированных дисков, спаянных по торцам (рис. 22). Пакет таких дисков ограничен с обеих сторон плоскими силовыми дисками. В результате образуется сужающийся гидравлический тракт с сечением в виде сот. Более эффективное отделение масла из потока достигается дроблением гидравлического тракта на множество мелких каналов, чем обеспечивается хорошее прилипание капель масла к стенкам каналов. На рис. 26 показана сравнительная зависимость количества неотделённого масла для колёс диаметром 100 мм, шириной 15 мм при расходе воздуха 30 г/с. При одинаковых габаритных размерах колёс и прочих равных условиях сотовое колесо обеспечивает снижение потерь масла с выходящим потоком воздуха, по сравнению с обычным колесом с радиальными лопатками, более чем в 2 раза.

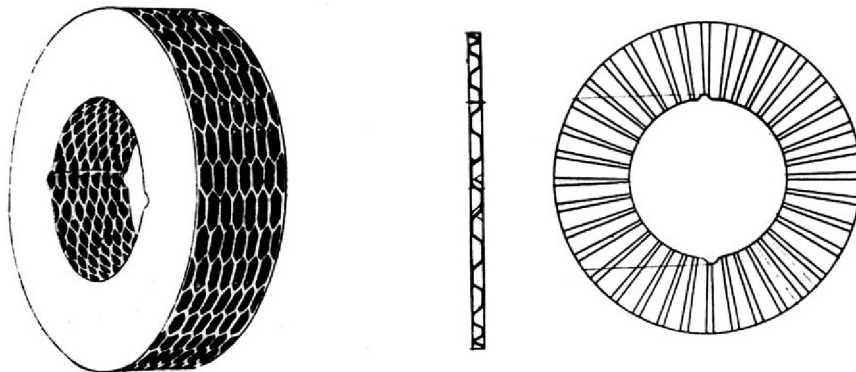


Рис. 25. Рабочее колесо сотовой конструкции

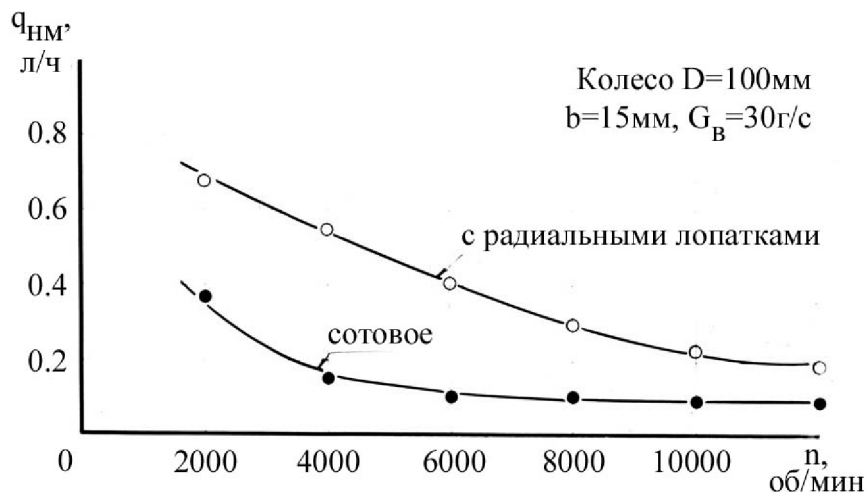


Рис. 26. Эффект от увеличения поверхности гидравлических каналов

Сотовое рабочее колесо применено в суфлёрах двигателей НК-25 и НК-32. Оно прошло большую практическую проверку.

8.2 Рабочее колесо со вставкой из металлорезины

Профессором СГАУ А.И. Белоусовым было предложено улучшить колесо сотовой конструкции за счёт вставки в него металлорезины (рис. 27). По результатам экспериментов это колесо показало более высокую эффективность маслоотделения, чем исходное сотовое. Однако для внедрения его в эксплуатацию необходимо решить две проблемы. Во-первых, следует исключить возможность попадания в масляную систему обломков металлической проволоки (являющейся основой металлорезины), что может произойти при больших наработках двигателя, как дефект усталостного характера. Во-вторых, надо предотвратить возможное «осмоление» металлорезины продуктами термического разложения масла, что приведёт к заужению проходного сечения рабочего колеса суфлёра и к увеличению его гидравлического сопротивления. Решение этих вопросов не представляется возможным без проведения соответствующих испытаний суфлёра с таким колесом в составе двигателя.



Рис. 27. Сотовое колесо с металлорезиной

9. Суфлёр с предварительной закруткой потока воздухомасляной смеси

Как установлено, концентрация масла в воздухомасляной смеси на входе в рабочее колесо при прочих равных условиях оказывает влияние на качество маслоотделения и на гидравлическое сопротивление суфлера. Поэтому уменьшение количества масла в воздухе за счет предварительного разделения фаз смеси до входа её в рабочее колесо является одним из направлений повышения эффективности данного агрегата.

Предварительное маслоотделение может быть осуществлено в статическом сепараторе, выполненном в виде отдельного устройства, установленного на линии подачи смеси к суфлеру. Так, например, статические маслоотделители типа «циклон» нашли применение в системах суфлирования двигателей Д-18Т и RB.199. Но использование такого решения приводит к увеличению массы агрегатов системы суфлирования и усложняет обвязку двигателя трубопроводами. Поэтому в этом вопросе разработчики идут на компромисс, решая, чему отдать предпочтение – снижению величины эксплуатационного расхода масла или упрощению конструкции.

Привлекательной является возможность совместить статический сепаратор с корпусом суфлера. Это решение было предложено в [6].

В соответствии с этим авторским свидетельством в ОКБ Генерального конструктора Н.Д. Кузнецова был спроектирован и изготовлен экспериментальный суфлёр (рис. 28). По существу, он представляет собой модернизацию серийного суфлера опоры турбины двигателя НК-25. Основное отличие экспериментального суфлера от серийного заключается в наличии на входе в его корпус специальной цилиндрической полости (предкамеры), выполненной соосно с рабочим колесом для предварительного маслоотделения.

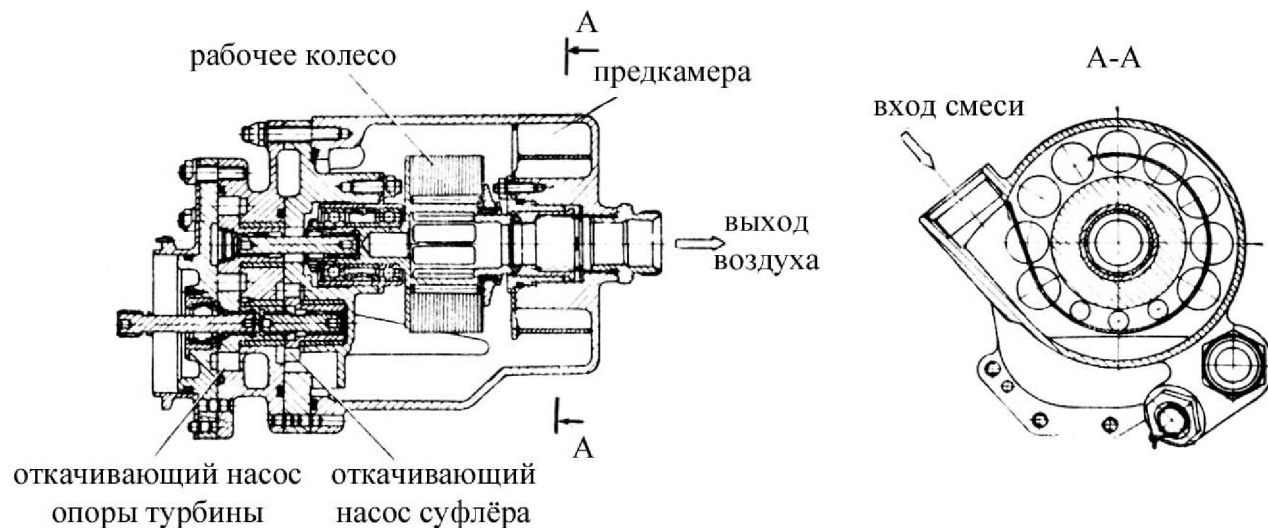


Рис. 28. Конструкция экспериментального суфлёра с предкамерой

Вход воздухомасляной смеси в предкамеру осуществляется через тангенциальный патрубок. При попадании смеси в предкамеру поток приобретает закрутку, и центробежные силы, действующие на частицы масла, способствуют их оседанию на внутренней поверхности корпуса. Отделенное масло стекает в нижнюю часть полости и оттуда поступает к откачивающему насосу. Закрученный в направлении вращения рабочего колеса поток воздухомасляной смеси поступает в его каналы при меньших углах атаки. Это способствует более плавному натеканию потока и уменьшению размера вихревой зоны в каналах колеса. Тем самым создаются условия для более эффективного маслоотделения в рабочем колесе суфлера и снижения его гидравлического сопротивления.

Сравнение эффективности серийного и экспериментального суфлера производили как на стенде, так и непосредственно на двигателе [7]. В процессе испытания на лабораторном стенде, оборудованном агрегатом для генерации воздухомасляной смеси, представляющим собой камеру с центробежными масляными форсунками, определяли гидравлическое сопротивление суфлера и количество неотделенного в нем масла.

При этом измеряли следующие величины:

- количество воздуха и масла, подаваемых в смеситель;
- температуру воздухомасляной смеси;
- давление в полости суфлера;
- давление за рабочим колесом;
- частоту вращения рабочего колеса;
- количество неотделенного масла.

Диапазон изменения расходов воздуха и масла составлял соответственно 10...80 и 50...130 г/с при частоте вращения рабочего колеса от 3000 до 9000 об/мин. Температуру воздухомасляной смеси поддерживали на уровне 100°C.

Кроме этого, на стенде был проведен эксперимент по визуальному наблюдению через прозрачную крышку структуры течения воздухомасляной смеси в корпусе серийного суфлера и в корпусе экспериментального суфлера.

Эксперимент с визуализацией структуры потока воздухомасляной смеси в корпусах суфлеров показал, что в месте выхода смеси из подводящего трубопровода в полость корпуса происходит срыв пленочно-кольцевого течения и дробление крупных капель потоком воздуха. А это оказывает негативное влияние на физический процесс маслоотделения в рабочем колесе. У экспериментального суфлера с предкамерой, имеющего тангенциальный вход, визуально отмечена значительно меньшая концентрация масла и практически отсутствие его мелких капель в зоне входа в рабочее колесо.

На рис. 29 показано сравнение результатов проведенного в идентичных условиях эксперимента по определению эффективности маслоотделения в серийном суфлере и в суфлере с предкамерой (в зависимости от расхода воздуха). Как видно из графика, в экспериментальном суфлере маслоотделение осуществляется значительно эффективнее.

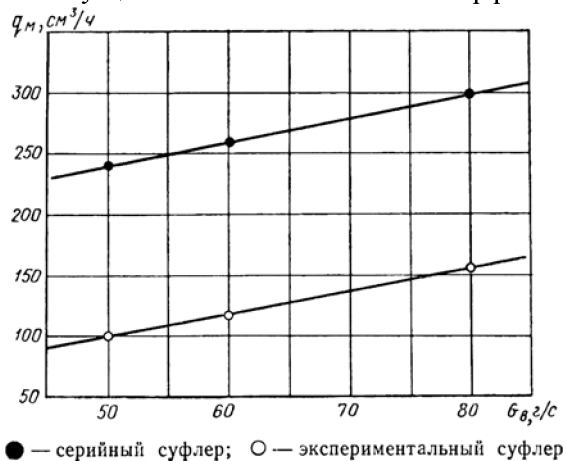


Рис. 29. Зависимость потерь масла через суфлёр

Эффективность маслоотделения в суфлере с предкамерой по сравнению с серийным суфлером была также проверена и при стендовых испытаниях двигателя НК-25. С этой целью трубопровод выхода воздуха из суфлера был выведен в стендовый бак-циклон, где оседало неотделенное в суфлере масло. Для получения более достоверных результатов часовой расход масла определяли за время работы, в течение 10 ч. Результаты испытания показали, что в одних и тех же условиях испытания двигателя при температуре масла на входе 100°C в экспериментальном суфлере опоры турбины с предкамерой потери масла по сравнению с серийным были уменьшены более чем в два раза.

10. Принципиальные схемы систем суфлирования, реализованные в отечественных и зарубежных ГТД

Для надёжного блокирования масла в масляной полости опоры необходимо создание на её уплотнениях перепада давления, направленного со стороны предмасляной полости, что может быть достигнуто только при условии непрерывного отвода из масляной полости опоры проникающего в неё воздуха, иначе говоря, эту полость необходимо суфлировать. Суфлирование может быть осуществлено либо с помощью откачивающего насоса, либо с помощью отводного канала, соединяющего масляную полость опоры с зоной более низкого давления.

Используемая условная терминология «суфлирование с помощью откачивающего насоса» имеет следующий физический смысл. Так, если производительность откачивающего насоса опоры ротора в несколько раз превышает количество подаваемого к узлам трения масла, то этот насос, в соответствии с его откачивающей способностью, будет отводить из масляной полости не только масло, но и определённое количество воздуха. А этот воздух будет засасываться в масляную полость через подвижные уплотнения валов, препятствуя утечке масла из неё. Способ суфлирования масляной полости с использованием откачивающего насоса предпочтительнее, так как он исключает необходимость в канале суфлирования и гарантирует проникновение в масляную полость опоры крайне незначительного, дозированного расхода воздуха. При этом в случае применения бесконтактных уплотнений, для которых характерны малые гидравлические потери, давление в масляной полости будет незначительно отличаться от давления наддувающего воздуха в предмасляной полости. Способ суфлирования с помощью откачивающего насоса при наличии только одного подвижного уплотнения в масляной полости опор отличается высокой надёжностью и практически исключает возможность утечек масла из неё.

При наличии в масляной полости опоры двух уплотнений между валом и статором задача предотвращения утечек масла из них становится весьма сложной. Здесь важным условием является то, что равенство давлений наддувающего воздуха перед обоими уплотнениями должно быть жёстко выдержано на всех режимах работы двигателя в любых условиях эксплуатации с целью исключения обратного перепада давления на одном из них. При суфлировании опоры с помощью откачивающего насоса его производительность выбирают, исходя из условия обеспечения минимально возможной скорости воздуха в уплотнениях на режиме малого газа, препятствующей утечке масла из масляной полости. Причём величина этой скорости будет существенно зависеть от конструктивного оформления масляной полости опоры, её объёма, прокачки масла и характера течения масла в узле (особенно при наличии центробежных эффектов). На переменных режимах, в случае резкого уменьшения оборотов ротора, возможны утечки масла через уплотнения, т.к. в воздушной полости падение давления произойдёт быстрее, чем внутри масляной полости. В связи с этим, такие опоры должны иметь предмасляные полости, из которых утечки масла отводят в дренажный бачок или за борт самолёта.

У созданных газотурбинных двигателей, как отечественных, так и зарубежных, как правило, масляные полости опор имеют не менее двух уплотнений. А у некоторых двух- и трёхвальных двигателей в масляных полостях бывает от 3 до 5 уплотнений (причём уровень давлений перед ними может быть различен), предотвратить утечки масла можно только за счёт использования специальных каналов суфлирования. Такие масляные полости суфлируют с помощью отводных каналов. Эти функции могут выполнять труба, полое ребро, со-

единающую опору с коробкой приводов, кожух рессоры привода, кольцевой межвальный канал, соединяющий, например, среднюю опору с опорой турбины, и другие полые элементы конструкции двигателя.

Воздух, проникающий через уплотнения в масляную полость опоры, в конечном итоге направляют в суфлёр, где он очищается от масла, а затем удаляется из двигателя. В зависимости от принципиальной схемы системы суфлирования опор на двигателе может быть один или несколько суфлёров. На созданных отечественных и зарубежных ГТД использованы самые разнообразные схемы системы суфлирования масляных полостей опор. Но среди них можно выделить наиболее типичные, рассмотренные ниже.

10.1. Объединённые системы суфлирования масляных полостей

подавляющее большинство авиационных ГТД имеют объединённую систему суфлирования масляных полостей. Ниже приведены примеры таких схем.

10.1.1. Двигатель RB-211

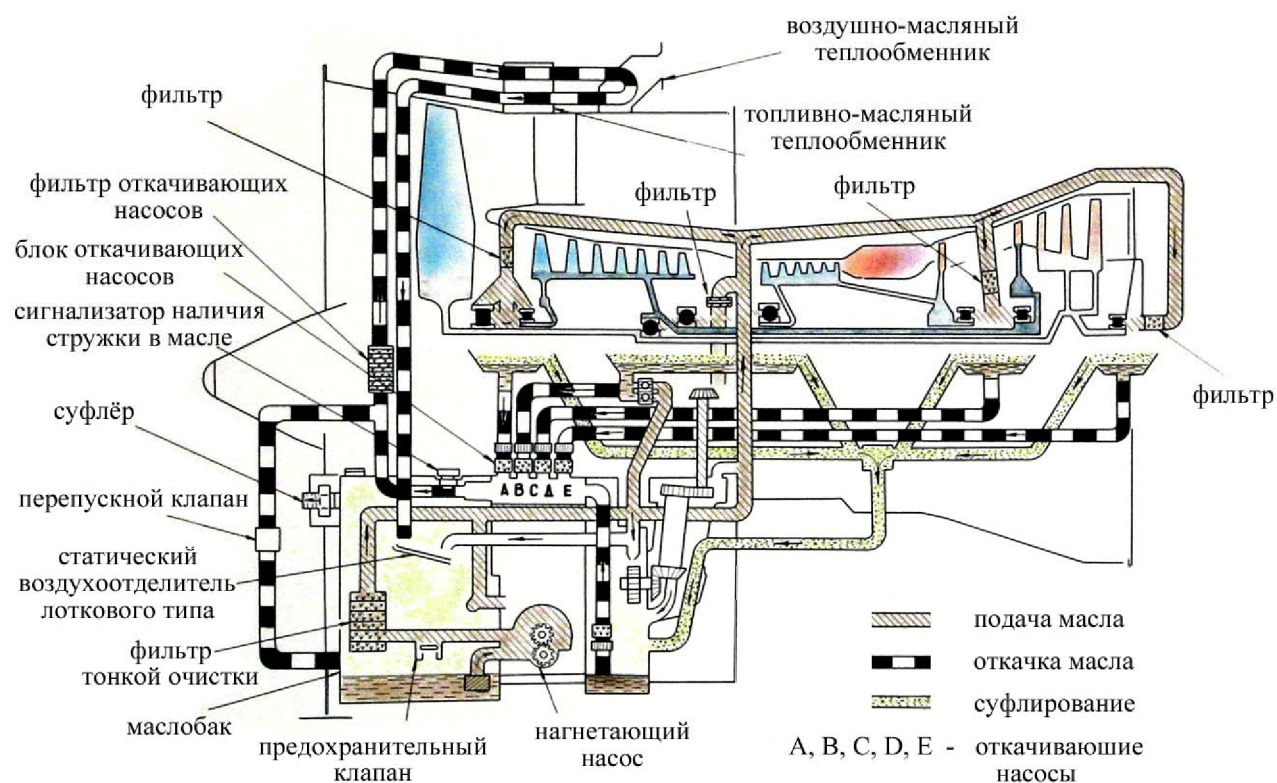


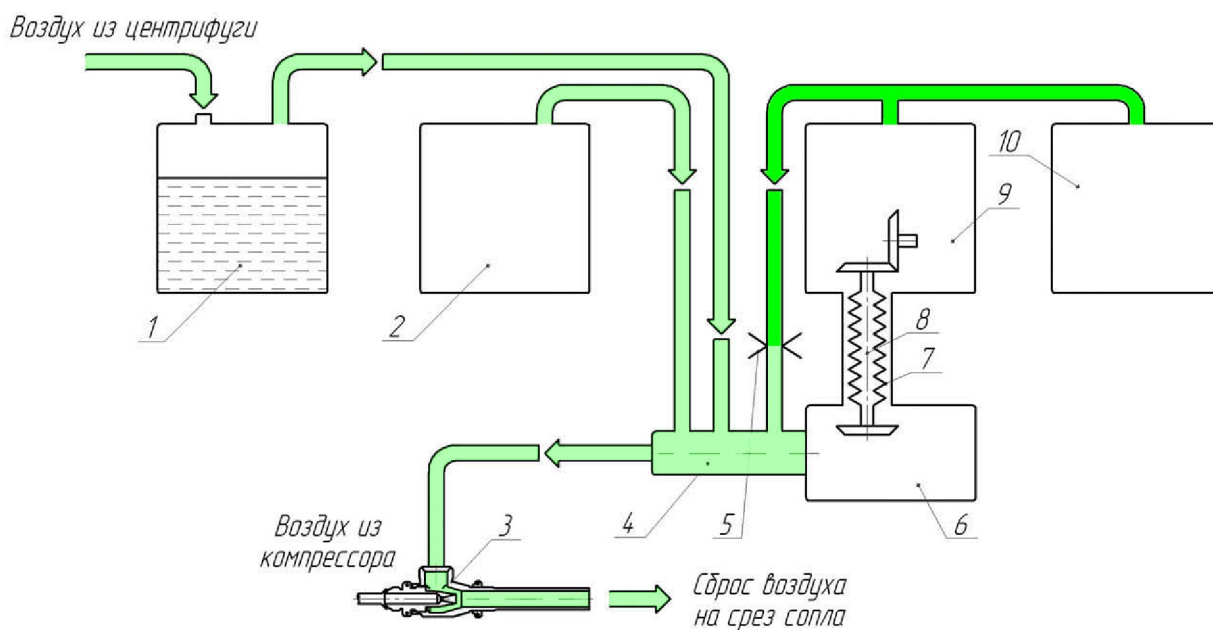
Рис. 30. Схема масляной системы двигателя RB-211

Схема объединённой системы суфлирования опор дозвукового двигателя RB-211 фирмы Роллс-Ройс отличается тем, что все опоры суфлируются с помощью отводных труб, соединяющих их с коробкой приводов, в которой размещён динамический суфлер (рис. 30). Сброс воздуха, очищенного в суфлере от масла, производится за борт летательного аппарата. Для такой схемы характерны большое количество труб и сложность доводки системы суфлирования. Кроме того, как видно на данном примере, может появиться необходимость в осуществлении тепловой защиты труб, проходящих через высокотемпературную зону в опоре турбины, что является сложной задачей.

10.1.2. Двигатель Д-27

Своеобразием отличается схема объединённой системы суфлирования масляных полостей двигателя Д-27. Здесь также все масляные полости с помощью отводных труб соеди-

нены с суфлёром (рис. 31). Но отличительной особенностью системы суфлирования данного двигателя является то, что в масляных полостях редуктора, передней опоры, коробок приводов и маслобака поддерживается незначительное разрежение относительно атмосферного давления, а в масляных полостях средней опоры и опоры турбины создают избыточное давление с целью ограничения величины расхода воздуха через уплотнения этих полостей.



1. Маслобак; 2. Редуктор, передняя опора, передняя коробка приводов (общая масляная полость); 3. Эжектор; 4. Суфлёр; 5. Жиклёр с регулируемым проходным сечением; 6. Задняя коробка приводов агрегатов; 7. Лабиринтное уплотнение; 8. Центральный привод; 9. Средняя опора; 10. Опора турбины

Рис. 31. Схема системы суфлирования двигателя Д-27

У данного двигателя использован суфлёр осевого типа. Он размещён на задней коробке приводов агрегатов. К нему подводится воздух из суфлируемых масляных полостей двигателя трубопроводами. Масло, отделённое в суфлере, самотёком сливается в заднюю коробку приводов агрегатов. Воздух, очищенный от масла, отводится из суфлёра с помощью эжектора. В последнем в качестве активного газа используется воздух, отбираемый за компрессором. Отвод воздуха из системы суфлирования осуществляется на срез сопла.

Уместно отметить, что в средней опоре и в опоре турбины данного двигателя отсутствуют межвальные уплотнения. Поэтому проходное сечение кольцевого канала между валами также способствует суфлированию масляной полости опоры турбины. Повышенный уровень избыточного давления в масляных полостях этих опор (до 0,15 МПа) обеспечивается за счёт дросселирования канала суфлирования их полостей в зоне входа в суфлёр (с помощью жиклёра с регулируемым проходным сечением). С этой же целью масляная полость средней опоры отделена от масляной полости коробки приводов лабиринтным уплотнением, установленным вокруг рессоры центрального привода. Масло из средней опоры откачивают отдельным насосом.

10.2. Суфлирование масляных полостей

с использованием откачивающих насосов

У сверхзвукового двигателя «Олимп»-593 передняя опора и две опоры турбины суфлируются с помощью откачивающих насосов, а средняя опора и маслобак – с помощью отводных каналов в одну из коробок приводов, где расположен центробежный суфлер (рис.

32). Воздух, удаляемый из системы суфлирования, у этого двигателя также сбрасывается за борт самолета.

Суфлирование большинства опор с помощью откачивающих насосов позволило использовать в конструкции этого двигателя бесконтактные щелевые и лабиринтные уплотнения масляных полостей при обеспечении расхода воздуха через них, соизмеримого с расходом воздуха через контактные уплотнения. По ориентировочной оценке, сделанной, исходя из известной производительности откачивающих насосов передней опоры и двух опор турбины, в масляные полости указанных опор двигателя проникает не более 5 г/с воздуха. Но через уплотнения средней опоры, вследствие большого перепада давления на них, прорывается значительно больший расход воздуха, но этот воздух сразу же поступает в суфлёр.

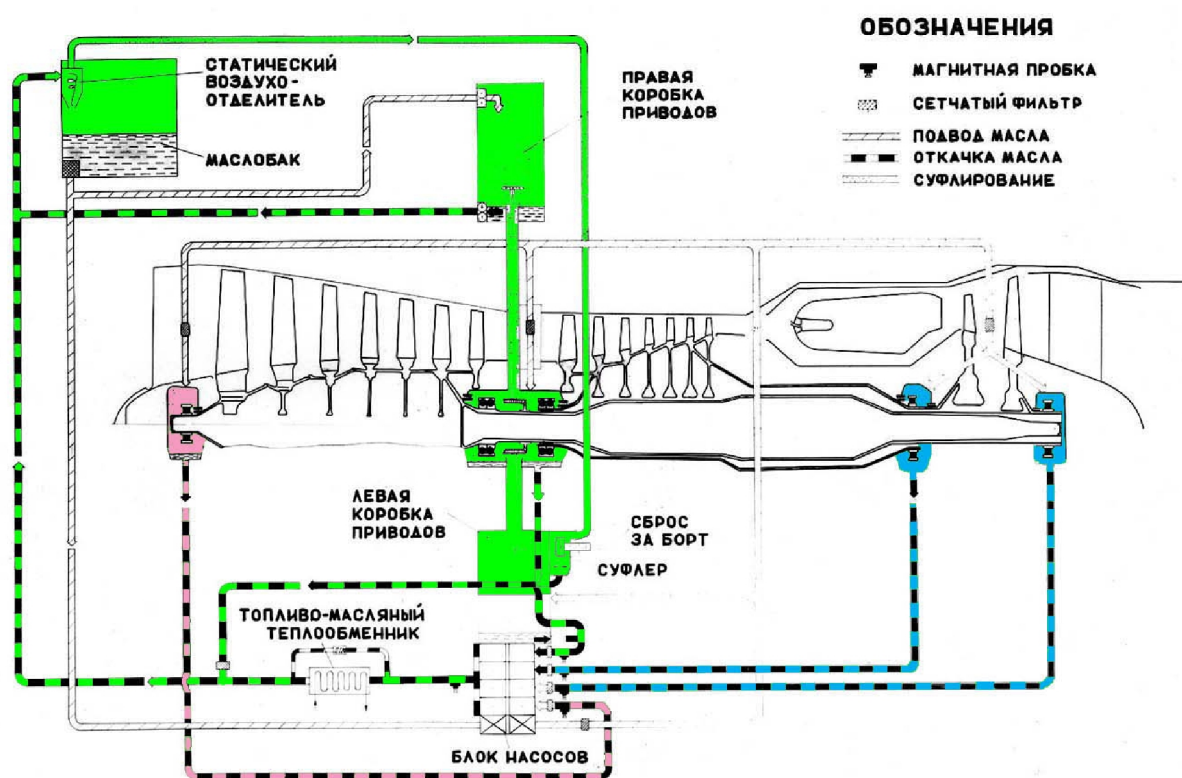


Рис. 32. Схема масляной системы двигателя "Олимп"-593

Отсутствие специальных каналов суфлирования в опорах турбины, резко снижающее возможность отложения кокса в коммуникациях масляной системы, является вторым преимуществом системы суфлирования, применённой на двигателе «Олимп»-593. Однако рассматриваемой системе присущ серьёзный недостаток – возможность утечек масла из опоры турбины высокого давления, имеющей два уплотнения и суфлируемой с помощью откачивающего насоса. В конструкции этой опоры на случай утечек приняты специальные меры для исключения загорания масла и попадания его в газозоудушный тракт. Именно этим вызвана многоярусность потоков вокруг опоры турбины высокого давления (рис. 33). Холодный воздух, омывающий опору, удаляется из двигателя и сбрасывается в мотогондолу.

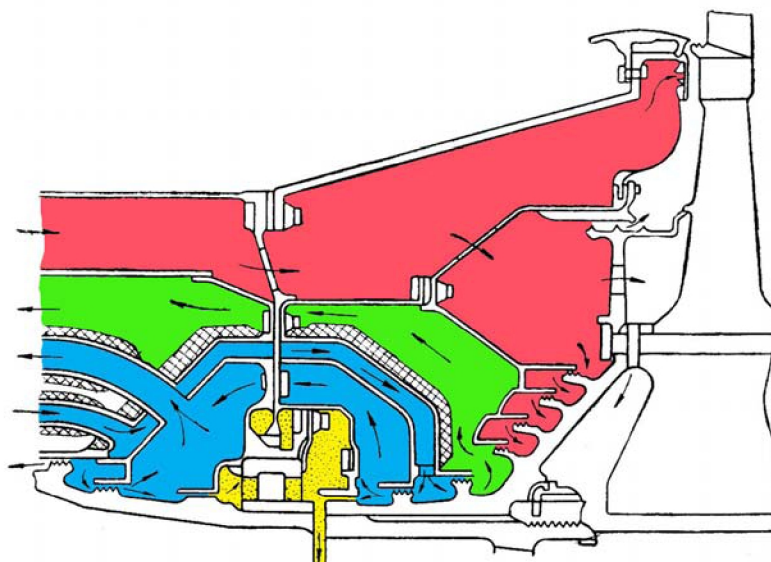


Рис. 33. Опора двигателя "Олимп"-593

10.3. Схемы суфлирования с размещением суфлёров на валу двигателя

10.3.1. Двигатель CF6-50

У ТРДД CF6-50 (фирма «Дженерал Электрик») применена оригинальная схема системы суфлирования (рис. 34). Каждая опора (кроме средней) имеет автономное суфлирование со сбросом воздуха, очищенного от масла, в валопровод ротора низкого давления. Такая схема оказалась возможной, благодаря использованию малогабаритных центробежных суфлеров радиального типа, установленных в опорах непосредственно на валу. В обвязке двигателя всего два трубопровода: из средней опоры воздух отводится в переднюю опору, а из статического воздухоотделителя маслобака в коробку приводов. Отвод очищенного воздуха из полого вала осуществляется внутри двигателя в затурбинную зону. Но поскольку выхлопные газы имеют высокую температуру, то по соображениям пожаробезопасности на срезе отводного канала предусмотрено специальное устройство, исключающее (в случае загорания воздухомасляной смеси на выходе) возможность проскока пламени в систему суфлирования.

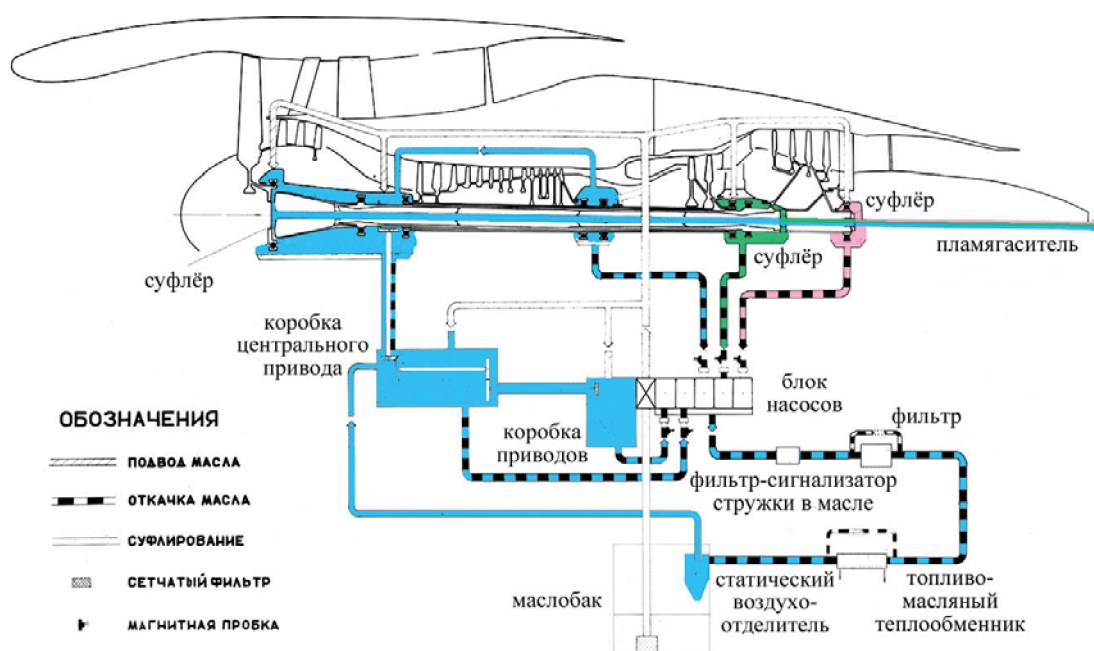


Рис. 34. Схема масляной системы двигателя CF6-50

10.3.2. Двигатель CFM-56

Развитием предыдущей схемы является система суфлирования двигателя CFM-56 (рис. 35). В нём количество масляных полостей сокращено до двух, соответственно уменьшено количество суфлёров и упрощена система подводящих и отводящих трубопроводов. Наддув уплотнений масляных полостей, как передней, так и задней опор, осуществляется воздухом, отбираемым за компрессором низкого давления. К задней опоре воздух подводится между валами низкого и высокого давления, а далее через отверстия в диске турбины. Для исключения подмешивания в зоне турбины горячего воздуха (из междисковых полостей) к надувавшему уплотнения холодному воздуху, в конструкции предусмотрена буферная полость. Уровень давления в буферной полости меньше, чем в полостях холодного и горячего воздуха, и поэтому два потока, поступая из указанных полостей в буферную, удаляются из последней.

Несмотря на определённые трудности в доводке системы суфлирования с центральным расположением отводного канала, надо отдать должное компактности её коммуникаций. При этом важным достоинством такого способа суфлирования является то, что трубопроводы суфлирования опоры турбины не пересекают высокотемпературный газовый тракт двигателя.

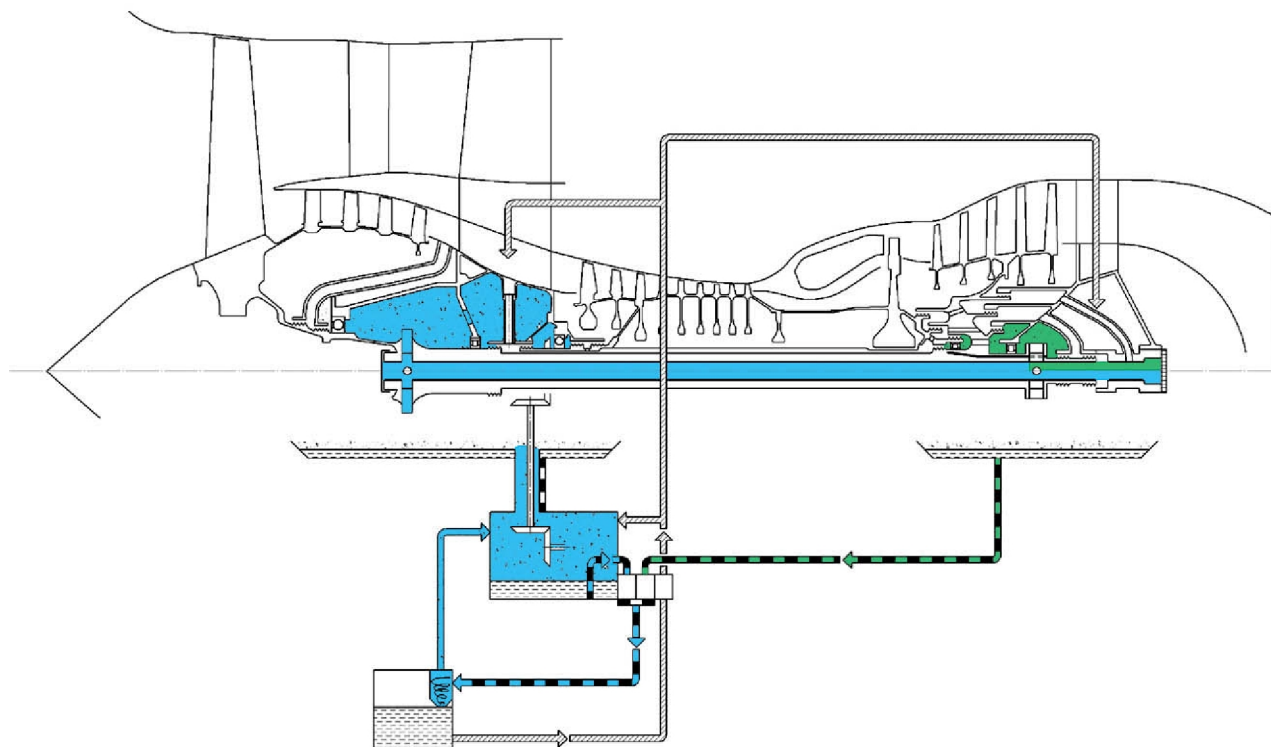


Рис. 35. Схема масляной системы двигателя CFM-56

10.4. Комбинированные схемы с автономным суфлированием масляных полостей опор

10.4.1. Двигатель НК-8-2У

Система суфлирования двигателя НК-8-2У является комбинированной, причём каждая опора суфлируется независимо от других (рис. 36). Маслобак не имеет суфлирования, т.к. маслосистема выполнена по короткозамкнутой схеме, при этом воздух из системы откачки масла в маслобак не поступает.

Одной из отличительных особенностей данной системы суфлирования является то, что из центрифуги (в которой производится сепарация откачиваемой из двигателя маслотовоздушной смеси) воздух на рабочих режимах отводится в коробку приводов. Но поскольку на режимах запуска и останова двигателя сепарирующая способность центрифуги низка, то на выходе из воздушного канала центрифуги установлен центробежный клапан. Этот клапан на режимах ниже малого газа закрыт, благодаря чему исключается возможность залива коробки приводов маслом из «воздушного» канала центрифуги. При этом на указанных режимах откачиваемая из узлов двигателя маслотовоздушная смесь поступает в нагнетающий насос, и, естественно, в этих условиях уровень давления масла на входе в двигатель будет пониженным, вследствие сжимаемости этой смеси. Но на работоспособность узлов трения это не влияет, так как для их смазки подаваемого масла более чем достаточно, а охлаждение этих узлов не является сложной проблемой. При выходе двигателя на режим «малый газ» центробежный клапан открывается и давление масла на входе в двигатель выходит на заданный уровень.

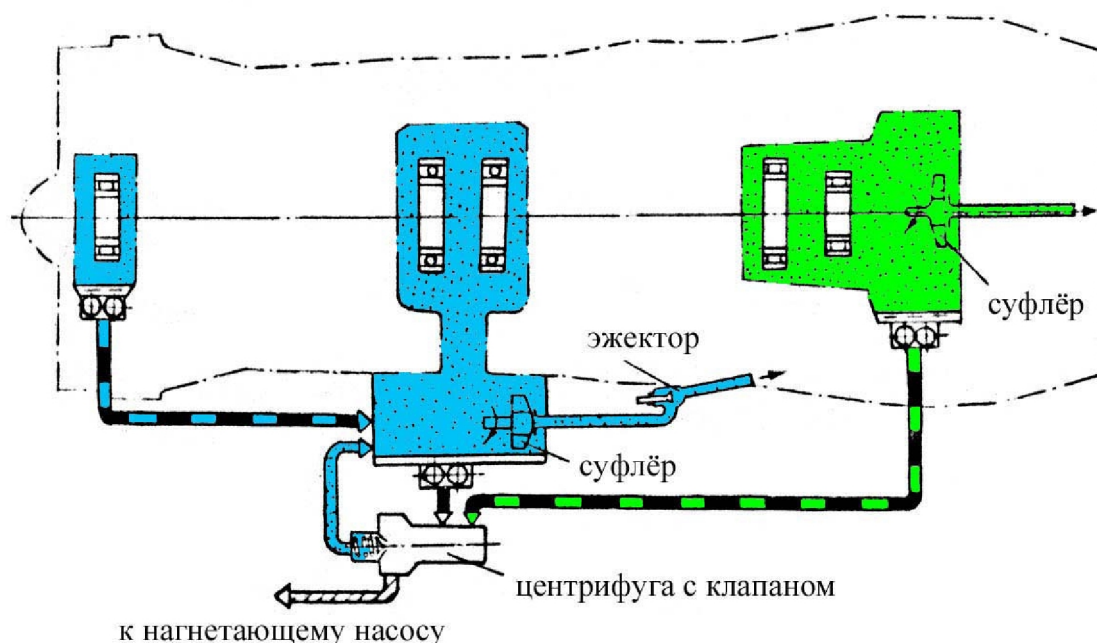


Рис. 36. Схема системы суфлирования двигателя НК-8-2У

Масляная полость передней опоры рассматриваемого двигателя суфлируется с помощью откачивающего насоса. Так как в этой опоре одно уплотнение (контактного типа), то утечек масла через него не происходит – через уплотнение непрерывно засасывается воздух, который далее поступает в откачивающий насос. Опора турбины имеет отдельный центробежный суфлёр радиального типа, расположенный непосредственно в её масляной полости. Отвод воздуха из суфлера опоры турбины осуществляется с помощью специального внутреннего трубопровода в зону низкого давления за турбиной в поток, вентилирующий пространство вокруг внутреннего корпуса опоры. Второй суфлер, расположенный в коробке приводов, очищает от масла воздух, который проникает через контактные уплотнения в масляную полость средней опоры, а также воздух, поступающий из откачивающих насосов передней опоры и опоры турбины. Сброс воздуха из этого суфлера осуществлён в наружный контур двигателя с помощью газового эжектора. В качестве активной среды в эжекторе используется воздух, отбираемый за компрессором. Таким образом, во внешней обвязке системы суфлирования двигателя НК-8-2У всего одна труба, соединяющая суфлёр опор компрессора с эжектором.

Автономное суфлирование опор позволило значительно упростить доводку масляной системы этого двигателя. Система суфлирования со сбросом воздуха, очищенного от масла, в тракт двигателя позволяет:

- упростить обвязку трубопроводов на двигателе и облегчить прокладку отводной трубы суфлирования в мотогондоле;

- исключить возможность замасливания самолета и аэродрома.

Таким образом, система суфлирования двигателя НК-8-2У лишена недостатков вышерассмотренных схем.

10.4.2. Двигатель НК-86

У двигателя НК-8-2У в начале его эксплуатации имели место отказы клапана на выходе из центрифуги, регулирующего сброс воздуха из центрифуги в коробку приводов. В связи с этим по настоянию ЦИАМ при создании двигателя НК-86 было принято решение об отводе воздуха из центрифуги в маслобак. Поэтому в отличие от предыдущей схемы в конструкцию двигателя были введены два трубопровода, соединяющих маслобак с центрифугой и коробкой приводов (рис. 37).

Однако стоит отметить, что сам клапан центрифуги в настоящее время у двигателя НК-8-2У доведён до совершенства, а его отказы сведены к минимуму и практически исключены. Поэтому запрет на его введение в конструкцию центрифуги можно считать нецелесообразным.

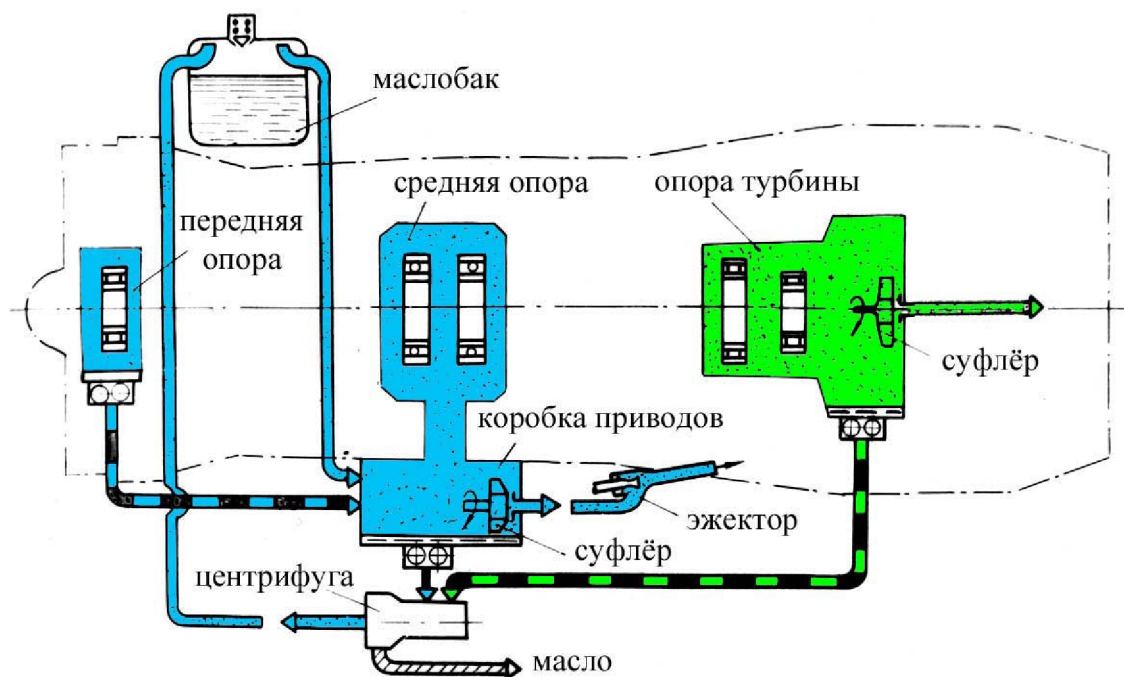


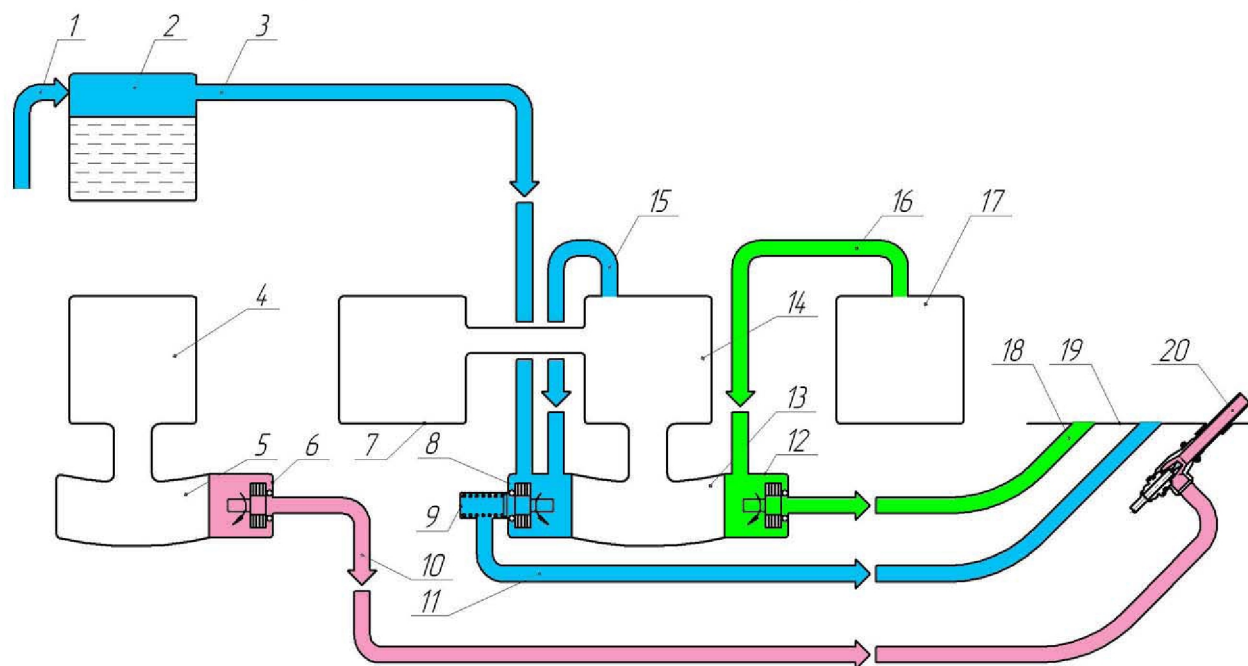
Рис. 37. Схема системы суфлирования двигателя НК-86

10.4.3. Двигатель НК-93

Система суфлирования двигателя НК-93 выполнена по комбинированной схеме с автономным суфлированием масляных полостей (рис.38). Суфлирование передней опоры, средней опоры, коробки приводов моторных агрегатов и масляного бака, в который сбрасывается воздух из центрифуг газогенератора и редуктора, производится объединённой системой. При этом центробежный суфлёр расположен на коробке приводов и сообщается сливным каналом с её масляной полостью. На выходе воздуха из этого суфлёра установлен высотный клапан, предназначенный для поддержания небольшого избыточного давления внутри маслобака и полостей передней и средней опор в высотных условиях и для исключения возможности повышения давления в указанных узлах в случае нерасчётного возрастания расхода воздуха через систему суфлирования.

Система суфлирования опоры турбины выполнена автономной и включает в себя суфлёр, объединённый в блок с откачивающим насосом данной опоры, и отводной трубопровод. В указанном агрегате для удаления из полости суфлёра отсепарированного масла предусмотрен специальный откачивающий насос.

В качестве сепарирующего элемента в суфлёрах опор компрессора и опор турбины используется унифицированное рабочее колесо сотовой конструкции.



1. Воздух из центрифуг; 2. Маслобак; 3. Воздух из маслобака; 4. Редуктор; 5. КСА; 6. Суфлёр редуктора
7. Передняя опора; 8. Суфлёр опор компрессора; 9. Высотный клапан; 10. Воздух из редуктора; 11. Воздух из опор компрессора; 12. Суфлёр турбины; 13. КПА; 14. Средняя опора; 15. Воздух из опор компрессора; 16. Воздух из опоры турбины; 17. Опора турбины; 18. Воздух из суфлёра турбины; 19. Оболочка сопла; 20. Эжектор

Рис. 38. Схема системы суфлирования двигателя НК-93

Воздух, проникающий в масляную полость редуктора через контактное уплотнение вала со стороны передней опоры компрессора и через манжетные уплотнения переднего и заднего винтовентилятора, отводится системой суфлирования в зону выходного сопла двигателя. При этом в масляной полости редуктора поддерживается небольшое разрежение за счёт использования эжектора. Суфлёр редуктора, сотовое рабочее колесо которого аналогично по конструкции рабочим колёсам суфлёров опор компрессора и турбины, установлен на коробке самолётных агрегатов (приводимой от вала турбины винтовентилятора).

Таким образом, схемы систем суфлирования масляных полостей рассмотренных двигателей принципиально различны. Кроме рассмотренных, известны и другие варианты, гибридно сочетающие отдельные элементы приведенных схем. Однако очевидно, что для каждого конкретного ГТД при его проектировании среди множества возможных решений конструкторами должна быть выбрана рациональная схема системы суфлирования масляных полостей двигателя, наилучшим образом соответствующая предъявляемым к ней требованиям. В последующих разделах учебного пособия даны рекомендации, относящиеся к проектированию систем суфлирования ГТД.

11. Особенности использования эжектора в системе суфлирования

Для сброса воздуха из системы суфлирования обычно используют специальную трубу, выведенную либо на срез реактивного сопла, либо за пределы мотогондолы. Однако использование отводного трубопровода увеличивает аэродинамическое сопротивление самолёта: в первом случае за счёт увеличения диаметра мотогондолы, а во втором – за счёт выведения в набегающий поток суфлирующей трубы. Это дополнительное сопротивление особенно велико у сверхзвукового самолёта.

В связи с этим в ОКБ Генерального конструктора Н.Д. Кузнецова возникла идея применить в системе суфлирования опор роторов ТРДД эжектор, использующий в качестве активной среды воздух, отбираемый от компрессора [8,9]. Из эжектора воздушная смесь отводится в наружный контур двигателя. Параллельно эжектор может выполнять и другую функцию – опорожнять дренажный бачок, в котором скапливается топливомасляной конденсат (утечки рабочих жидкостей) из агрегатов двигателя.

Очевидно, такой эжектор должен иметь достаточную производительность, иначе давление в масляных полостях опор будет возрастать и, вследствие уменьшения перепада давления на их уплотнениях, из масляных полостей могут происходить утечки масла. Кроме того, часть суфлируемого воздуха может выдуваться через дренажный бачок, приводя к замасливанию двигателя. Следовательно, важнейшим условием обеспечения работоспособности подобной системы является правильный выбор геометрических размеров эжектора, определяющих необходимую производительность этого струйного насоса при заданном противодавлении на выходе из камеры смешения.

Суфлирование масляных полостей опор компрессоров с помощью эжектора осуществлено в конструкции двигателей НК-8-2У, НК-8-4, НК-86, НК-144, НК-22, НК-25 и НК-32. Такое использование эжектора особенно большую практическую проверку прошло на двигателях НК-8-2У, НК-8-4 и НК-86. Как показал опыт их эксплуатации на самолётах гражданской авиации (Ту-154, Ил-62 и Ил-86), использование газового эжектора в системе суфлирования опор роторов ТРДД является удачным решением как с конструктивной, так и с эксплуатационной точки зрения. Эжектор не содержит движущихся элементов и потому имеет высокую надёжность и практически неограниченный срок службы. Отбор воздуха от компрессора для эжектора составляет незначительную величину от расхода через внутренний контур двигателя (не более 0,2 %) Причём воздух из эжектора сбрасывается не в атмосферу, а утилизируется в наружном контуре двигателя.

Рассмотрим основные этапы проектирования эжектора, используемого для суфлирования масляных полостей ГТД, и связанные с этим вопросы.

1. Для выбора оптимального эжектора необходимо знать влияние различных геометрических размеров на его гидравлические характеристики. Так, одним из основных элементов эжектора является камера смешения потоков активного и пассивного газов. Камера, изготовленная по специальному профилю, эффективна в узком диапазоне режимов, поэтому для рассматриваемой цели рациональнее использовать эжектор с цилиндрической камерой смешения. Рекомендуемая относительная длина такой камеры находится в диапазоне 6-10 калибров.

Эжектор целесообразно выполнить без выходного диффузора, так как работа диффузора на нерасчётных режимах связана с большими гидравлическими потерями.

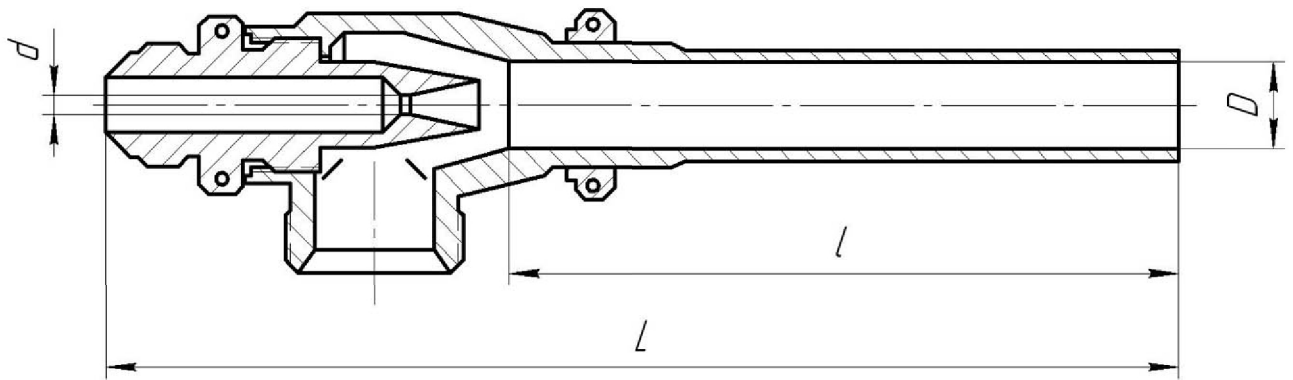


Рис. 39. Сверхзвуковой газовый эжектор

Проектируемый эжектор должен быть сверхзвуковым (рис. 39), так как при работе двигателя на некоторых режимах потребная величина степени сжатия эжектора должна быть выше 4, а звуковой газовый эжектор с цилиндрической камерой смешения не может обеспечить степень сжатия, превышающую 3,5 [10].

Для повышения эффективности эжектора сопло активного газа желательно было бы выполнить регулируемым. Однако это конструктивно сложно и потребует введения специальной системы управления. В качестве сверхзвукового сопла активного газа используют сопло Лавала с конической сверхзвуковой частью. Угол раскрытия сверхзвуковой части этого сопла обычно выбирают в диапазоне от 12 до 24°. Использование профилированного сопла нецелесообразно, так как оно технологически сложнее конического, а преимущество перед последним имеет только на расчётном режиме.

Оптимальное расстояние между срезом сопла активного газа и входным сечением камеры смешения определяют экспериментально. По статистике для эжекторов рассматриваемого класса оно находится в диапазоне $(1 \div 1,5) d$.

Сопло пассивного газа должно создавать условия для плавного соприкосновения потоков. Его, как правило, изготавливают коническим с малым углом между образующими (в диапазоне от 20 до 30°).

Важнейшим геометрическим параметром эжектора с цилиндрической камерой смешения, представленного на рис.39, является относительная площадь критического сечения сопла активного газа ($\bar{f}$):

$$\bar{f} = (d / D)^2, \quad (11.1)$$

где d – диаметр критического сечения сопла активного газа,
 D – диаметр камеры смешения.

Именно этот параметр характеризует его потенциальную напорность

Для обеспечения высокой степени сжатия эжектора необходимо иметь большую относительную площадь критического сечения сопла. Но, к сожалению, негативной особенностью такого эжектора является его работа с малыми коэффициентами эжекции.

Таким образом, проектируемый эжектор должен быть сверхзвуковым, иметь сравнительно большую относительную площадь критического сечения сопла активного газа, цилиндрическую камеру смешения с длиной, равной 6-10 калибрам, и не иметь выходного диффузора.

Проектирование эжектора необходимо производить в два этапа:

- выбрать модель эжектора, позволяющую обеспечить требуемую степень повышения давления пассивного газа;
- по заданной максимально возможной величине расхода пассивного газа определить геометрические размеры эжектора выбранной модели.

2. Выбор модели эжектора производят, исходя из условия обеспечения требуемых напорных характеристик. Под характеристиками эжектора [11] понимают семейство кривых,

устанавливающих связь между степенью повышения давления эжектируемого газа ($\bar{p} = P_{вых} / P_{nac}^*$) и коэффициентом эжекции ($\kappa = G_{nac} / G_{акт}$) при постоянных значениях отношений полных давлений в струях активного и пассивного газа ($\sigma = P_{акт}^* / P_{nac}^*$).

Здесь использованы следующие обозначения:

- P_{nac}^* – полное давление пассивного (эжектируемого) газа на входе в эжектор,
- $P_{акт}^*$ – полное давление активного (эжектирующего) газа на входе в эжектор,
- $P_{вых}$ – давление среды, в которую осуществлён сброс газа из эжектора (т.е., по существу, противодействие на выходе из камеры смешения),
- G_{nac} – расход пассивного газа,
- $G_{акт}$ – расход активного газа.

Так как указанные характеристики связывают безразмерные величины, то они идентичны для всех геометрически подобных моделей эжектора.

Типичная зависимость степени повышения давления эжектируемого газа от коэффициента эжекции при фиксированном значении отношения полных давлений в струях (σ) показана на рис. 40.

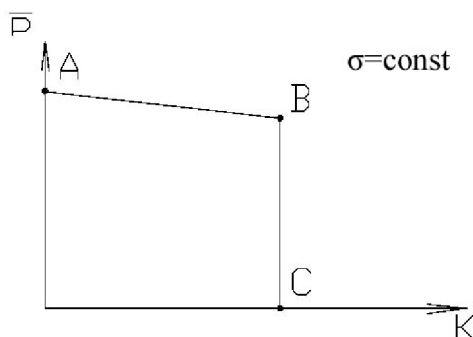


Рис. 40. Дроссельная характеристика эжектора

Буквами А, В и С здесь отмечены специфические точки этой зависимости. Точка А характеризует максимальную степень сжатия, которую при заданном значении σ может обеспечить определённая модель эжектора (с нулевым коэффициентом эжекции). Дальнейшее увеличение степени сжатия выше точки А приводит к отрицательному значению коэффициента эжекции, т.е. часть эжектирующего газа начнёт поступать в канал эжектируемого газа. При уменьшении степени сжатия ниже точки А коэффициент эжекции увеличивается. Но это увеличение происходит до тех пор, пока в камере смешения эжектора скорость потока не достигнет звукового уровня, приводящего к «запиранию» эжектора. Точка С характеризует предельную величину коэффициента эжекции при заданном значении σ .

Точка В на диаграмме характеризует наступление указанного критического режима работы эжектора. Эту степень сжатия эжектора называют предельной ($\bar{p}_{пред}$), т.к. при заданном значении σ она соответствует предельному режиму «запирания». При уменьшении противодействия на выходе из камеры смешения на участке ВС коэффициент эжекции остаётся постоянным, т.е. при всех значениях степеней сжатия на данной вертикальной ветви характеристики эжектор работает в режиме «запирания».

С увеличением значения σ будет возрастать максимальная и предельная степени сжатия эжектора, но при этом будет уменьшаться и предельная величина коэффициента эжекции (рис.41). Линия, проведённая через точки предельных степеней сжатия, соответствующих различным значениям σ , ограничивает зону работоспособности конкретной модели эжектора (с определённой величиной $\bar{f}$). Эта зона находится слева от указанной огибающей линии, представляющей собой семейство точек предельных режимов «запирания» эжектора.

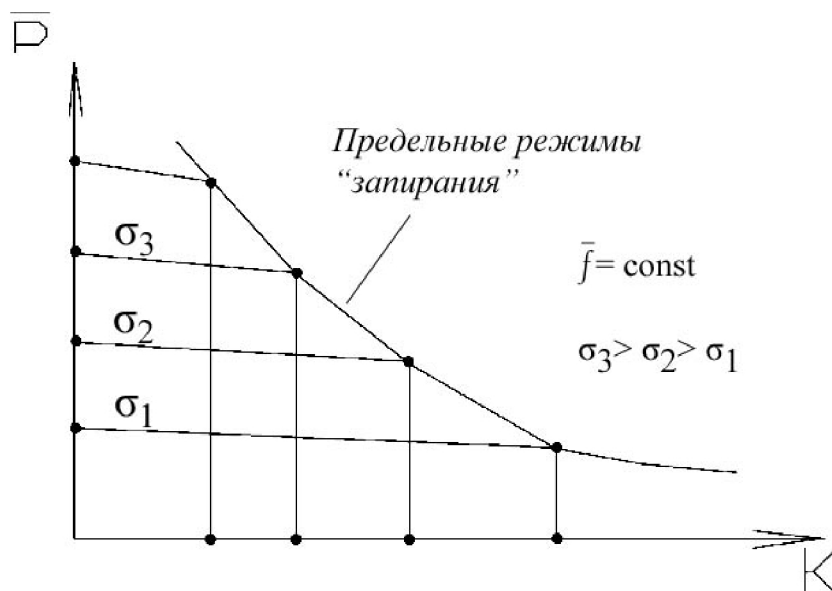


Рис. 41. Типичное семейство дроссельных характеристик модели эжектора

3. Проведённый анализ показывает, что при выборе модели эжектора, обеспечивающей требуемую напорность, определяющими являются условия работы двигателя на высотном крейсерском режиме. При этом в качестве исходных данных для расчётов должны быть использованы следующие параметры:

- давление активного воздуха в коллекторе его отбора из компрессора,
- полное давление пассивного воздуха на выходе из суфлёра,
- давление среды, в которую происходит истечение смеси из эжектора.

3.1. Величина полного давления активного воздуха в коллекторе ($P_{кол}^*$) зависит от того, за какой из ступеней компрессора он расположен, а численно она равна статическому давлению в тракте компрессора за той ступенью, из которой осуществлён отбор воздуха. И соответственно, полное давление активного воздуха на входе в эжектор будет равно

$$P_{акт}^* = P_{кол}^* - \Delta P_{\Sigma акт} = v_{акт} * P_{кол}^* \quad (11.2)$$

где: $\Delta P_{\Sigma акт}$ – общие потери давления активного воздуха (путевые и местные), при движении его от коллектора до эжектора,

$v_{акт}$ – коэффициент восстановления полного давления активного воздуха на участке от коллектора до эжектора.

3.2. Величину давления пассивного газа за суфлёром ($P_{вых.суфл.}^*$) задают с учётом возможных ограничений, связанных с взаимодействием системы суфлирования с другими системами двигателя. Так, например, если эжектор одновременно выполняет также функцию опорожнения дренажного бачка, то величину давления на выходе из суфлёра принимают равной атмосферному давлению на расчётной высоте крейсерского полёта. Но в том случае, если за суфлёром необходимо создать подпор давления (с целью обеспечения надёжной от качки масла в высотных условиях), а эжектор не связан с системой дренажа, то величину давления за суфлёром следует принять примерно вдвое большей по сравнению с атмосферным давлением на расчётной высоте.

Тогда полное давление пассивного газа на входе в эжектор будет равно:

$$P_{пас}^* = P_{вых.суфл.}^* - \Delta P_{\Sigma пас} = v_{пас} * P_{вых.суфл.}^* \quad (11.3)$$

где $\Delta P_{\Sigma пас}$ – общие потери давления пассивного газа на участке от суфлёра до эжектора;

$v_{пас}$ – коэффициент восстановления полного давления пассивного газа.

3.3. Что касается величины давления на выходе из камеры смешения, то она зависит от того, куда осуществляется сброс смеси из эжектора (в наружный контур ТРДД или в атмосферу). Этим будет определяться потребная степень повышения давления пассивного газа. Так, например, если эжектор установлен на оболочке ТРДД и выходное сечение камеры

смешения находится в воздушном тракте наружного контура двигателя, то давление на выходе из эжектора будет равно статическому давлению воздуха в том сечении наружного контура, в котором заканчивается камера смешения. Его величину определяют из следующего соотношения:

$$P_{вых} = v_{II} * P^*_{\epsilon} * \pi(\lambda_{II}), \quad (11.4)$$

где P^*_{ϵ} – полное давление за вентилятором,

v_{II} – коэффициент восстановления полного давления в наружном контуре (на участке от вентилятора до места установки эжектора),

$\pi(\lambda_{II})$ – газодинамическая функция, определяющая связь статического и полного давления (через относительную скорость потока в месте установки эжектора, λ_{II}).

В том случае, если сброс воздуха из эжектора производят в атмосферу (за борт летательного аппарата или на срез сопла ГТД), то очевидно, что при таких вариантах давление на выходе из эжектора будет равно атмосферному давлению.

$$P_{вых} = P_H.$$

4. При использовании указанных данных может быть произведён предварительный выбор модели сверхзвукового эжектора с цилиндрической камерой смешения.

4.1. Величину характерного отношения давлений в струях активного и пассивного газа можно определить по формуле:

$$\sigma = v_{акт} P^*_{кол} / v_{пасс} P^*_{вых.суфл.} \quad (11.5)$$

С достаточной для практики точностью можно принять $v_{акт} = v_{пасс}$, при этом исходное расчётное значение σ будет равно:

$$\sigma = P^*_{кол} / P^*_{вых.суфл.} \quad (11.6)$$

При этом следует иметь в виду, что у авиационного двигателя отборы воздуха производят не только за компрессором, но ещё и за какой-нибудь его промежуточной ступенью. Так как расчётная величина σ будет зависеть от места отбора воздуха, то у этого параметра будет два варианта, из которых надо выбрать более приемлемый по уровню давления активного газа.

Что касается величины потребной степени сжатия ($\bar{p}$), то при сбросе смеси из эжектора в атмосферу она будет немногим более единицы. Но в случае отвода воздуха из камеры смешения в наружный контур ТРДД эжектор должен обеспечивать сжатие пассивного газа до уровня, достаточного для сброса смеси в воздушный поток наружного контура.

Поэтому первая часть задачи по выбору эжектора для рассматриваемой цели сводится к выбору оптимальной его модели, которая при определённых значениях σ и предельной степени сжатия $\bar{P}_{пред}$ обеспечивала бы наибольшую величину коэффициента эжекции. При этом расчётную величину $\bar{D} = P_{вых} / P^*_{нас}$ определяют с учётом п.п. 3.2 и 3.3.

4.2. В схеме со сбросом воздуха из эжектора в наружный контур ТРДД выбор положения расчётной рабочей точки на характеристике эжектора необходимо производить, исходя из условия, чтобы эта точка находилась на вертикальном участке ВС, как можно ближе к точке В. Что касается участка АВ, то, вследствие его пологости, здесь иметь рабочую точку нежелательно, так как в случае даже незначительного повышения противодавления (на выходе из камеры смешения), будет происходить существенное уменьшение величины коэффициента эжекции, а то и вовсе она может стать отрицательной.

4.3. Используя исходные данные по располагаемой величине σ и требуемой степени сжатия эжектируемого воздуха ($\bar{p}$), может быть выбрана оптимальная модель эжектора, имеющая искомую величину $\bar{f}$. При этом, как было ранее отмечено, расчётным является крейсерский режим работы двигателя в высотных условиях.

Указанная величина $\bar{f}$ может быть найдена расчётным путём из системы уравнений эжекции, составленных для сверхзвуковых газовых эжекторов с цилиндрической камерой смещения [11]. Но в ОАО «СНТК им. Н.Д. Кузнецова» для решения этой задачи используется упрощённый подход. Он базируется на обобщённых экспериментальных данных, устанавливающих связь между предельной степенью сжатия ($\bar{p}_{\text{пред}}$) и относительной площадью критического сечения сопла активного газа $\bar{f}$ при различных значениях σ . Эти данные (рис. 42), представляющие собой аппроксимацию соответствующих результатов многочисленных исследований характеристик сверхзвуковых газовых эжекторов с цилиндрической камерой смещения, в графическом виде устанавливают связь между вышеуказанными безразмерными параметрами, определяющими эффективность различных моделей эжекторов.

Таким образом, зная для расчётного режима работы двигателя характерное отношение полных давлений активного и пассивного газа на входе в эжектор (σ) и требуемую величину степени сжатия эжектируемого воздуха ($\bar{p}$), с использованием семейства кривых, характеризующих предельные степени сжатия (рис. 42), можно найти искомую величину $\bar{f}$. На основании этого с учётом ранее описанных геометрических особенностей сверхзвуковых газовых эжекторов с цилиндрической камерой смещения производят выбор модели эжектора, обеспечивающей требуемую напорность.

Следует отметить, что в ОАО «СНТК им. Н.Д. Кузнецова» также было проведено обобщение экспериментальных данных, характеризующих коэффициенты эжекции для моделей с различными относительными площадями критического сечения сопла активного газа. Указанные зависимости приведены на рис. 43 в виде семейства кривых при фиксированных значениях σ . По оси ординат на данном рисунке представлен безразмерный комплекс в виде произведения коэффициента эжекции и корректирующего сомножителя, учитывающего влияние соотношения температур пассивного и активного газа на эффективность эжектора.

5. Вторым этапом проектирования эжектора выбранной модели является определение его потребных размеров. Данный расчёт производят применительно к максимальному режиму в условиях $H = 0$ км, $M = 0$, САУ. Это связано с тем, что на этом режиме имеют место наибольшие расходы воздуха, проникающего через подвижные уплотнения валов в масляные полости опор.

При проектировании авиационного двигателя в обязательном порядке устанавливают допустимые нормы на величины расхода воздуха через уплотнения для указанного режима работы. Эти нормы содержатся в частных ТЗ на опоры роторов и на масляную систему. Причём нормы максимально допустимого расхода воздуха ($G_{в \text{ max}}$) оговаривают для случая максимально возможного износа уплотнений (предусмотренного технической документацией). Но при этом следует учесть требование [12] о том, что пропускная способность системы суфлирования должна иметь определённый запас сверх указанного расхода. Так как эжектор применяют для суфлирования масляных полостей опор, в которых установлены контактные уплотнения, то в этом случае величина коэффициента запаса пропускной способности системы суфлирования должна быть принята равной 2,5. Поэтому определение потребных размеров эжектора производят, исходя из условия необходимости отвода из суфлёра пассивного воздуха в количестве $G_{\text{нас}} = 2,5 G_{в \text{ max}}$.

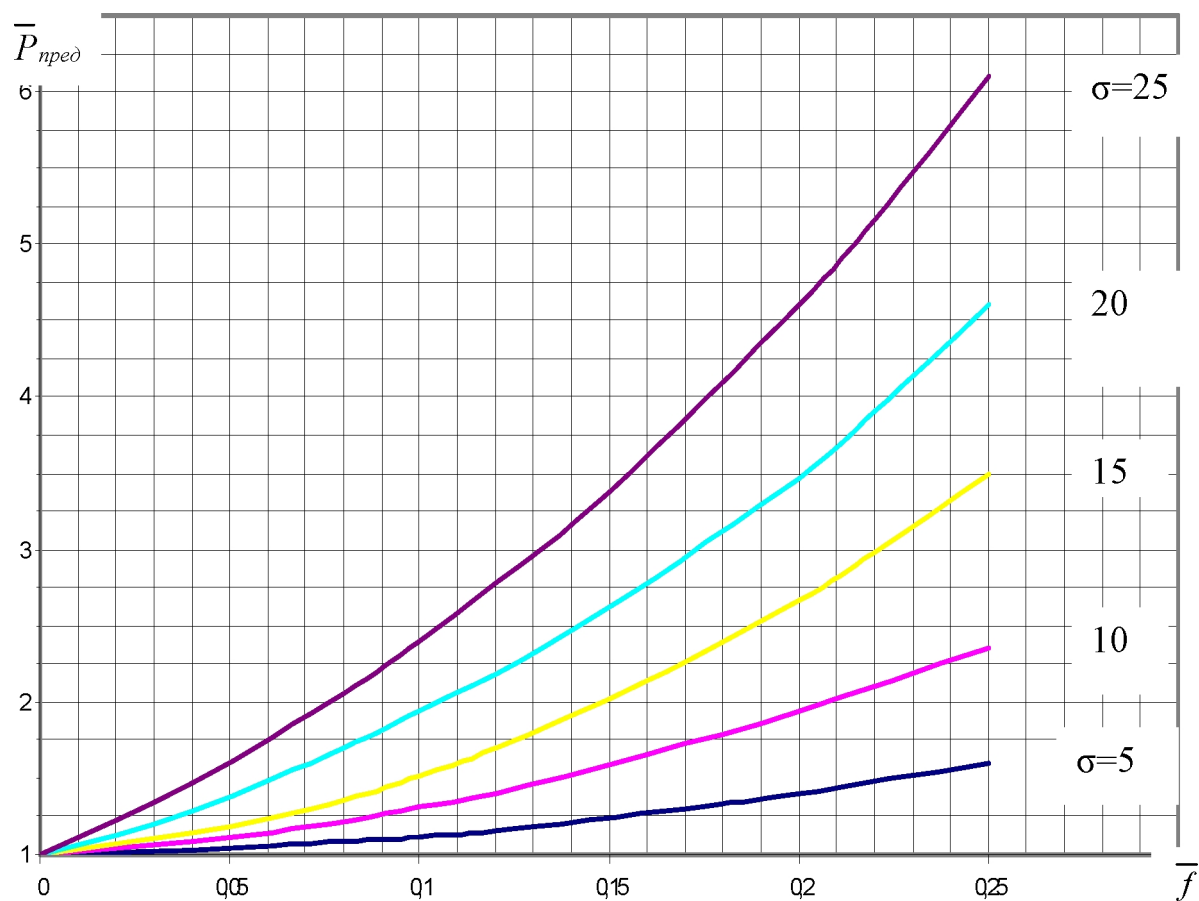


Рис. 42. Предельные степени сжатия для разных моделей эжекторов

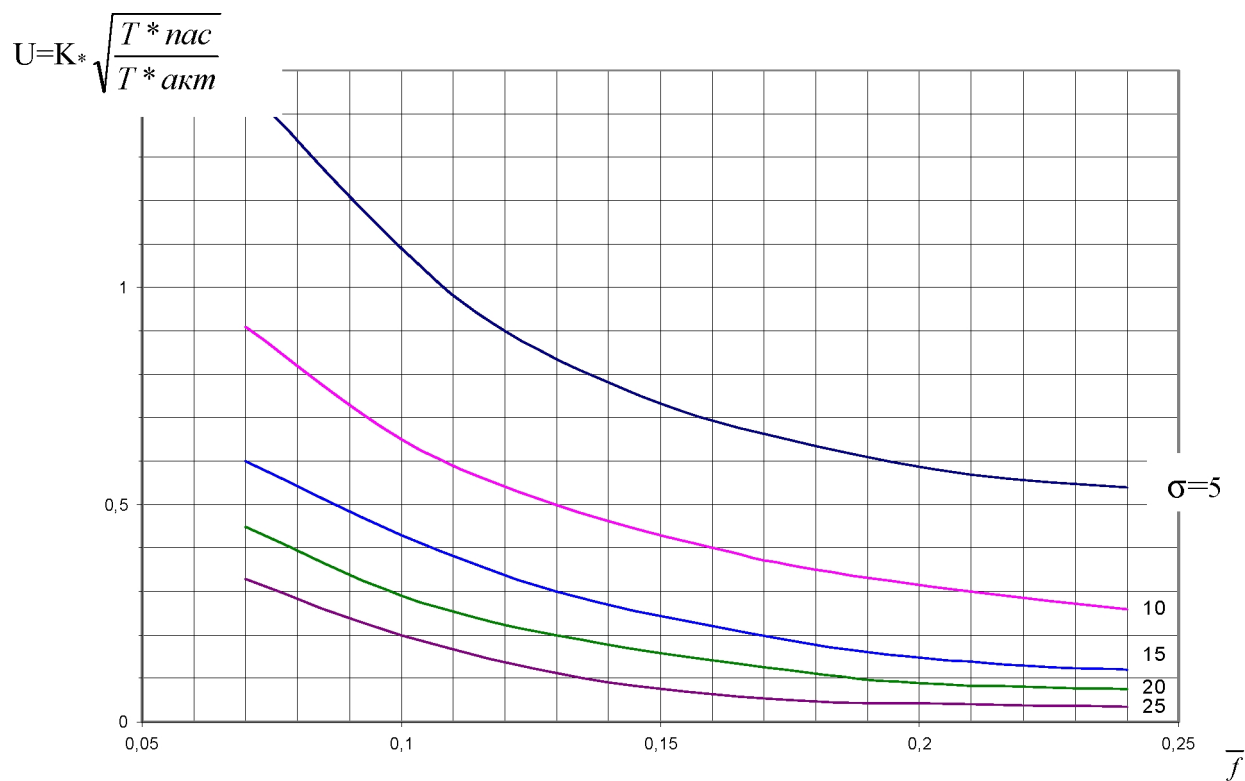


Рис. 43. Эжектирующая способность различных моделей

Для максимального режима работы двигателя находят величину отношения полных давлений активного и пассивного газа $\sigma = P_{кол}^* / P_n$,

где: $P_{кол}^*$ – давление активного воздуха в коллекторе отбора, Па;

P_n – нормальное атмосферное давление в земных условиях, Па.

Таким образом, исходными данными для расчёта потребной размерности эжектора выбранной модели являются величина σ на максимальном режиме в земных условиях и соответствующее ей значение U , определённое с использованием рис. 43. Найденный показатель U позволяет определить потребную величину расхода активного газа

$$G_{акт} = G_{пас} \sqrt{T_{пас}^* / T_{акт}^*} / U \quad (11.7)$$

А это даёт возможность найти потребную площадь критического сечения сопла активного газа

$$f_{кр} = G_{акт} \sqrt{T_{акт}^*} / (0,396 \cdot P_{акт}^*) \quad (11.8)$$

и его диаметр $d = 1,129 \sqrt{f_{кр}}$.

Площадь сечения камеры смешения эжектора находят из соотношения:

$$F_{к.см.} = f_{кр} / \bar{f}$$

и соответственно диаметр камеры смешения будет равен

$$D = 1,129 \sqrt{F_{к.см.}}$$

Остальные геометрические размеры эжектора выбирают в соответствии с рекомендациями, приведенными в начале данного раздела.

6. Практика показала, что у серийных двигателей неизбежно возникает некоторый разброс по уровню давления в системе суфлирования, что обусловлено различием в величинах расхода через уплотнения масляных полостей опор. При этом следует отметить, что характеристики самого эжектора от точности его изготовления зависят незначительно. Проведенные в ОАО «СНТК им. Н.Д. Кузнецова» исследования показали, что у эжектора во всем диапазоне допусков на определяющие геометрические размеры его элементов (камеры смешения, сопел активного и пассивного газа и др.) отклонение по производительности укладывается в $\pm 1,5\%$ от среднего значения. В случае возникающей необходимости размеры эжектора могут быть увеличены. Так, например, на двигателе НК-25, уже в процессе его серийного производства, диаметр камеры смешения эжектора был увеличен с 20 до 23 мм и соответственно были изменены остальные геометрические размеры.

Проверка работоспособности эжектора производится как в земных (стендовых) условиях, так и в полёте. В технических требованиях к двигателю оговорена максимально допустимая величина давления в масляной полости средней опоры. Следовательно, на основании измерений величины этого параметра при работе двигателя в различных условиях может быть сделано заключение о работоспособности эжектора.

Окончательный вывод о достаточности производительности эжектора может быть сделан только после набора определенной статистики. При этом следует иметь в виду, что на отдельных двигателях повышенное давление в масляной полости опоры может явиться следствием некачественной сборки уплотнений или отклонений от нормы гидравлических характеристик внутренних каналов опоры (чего нельзя исключать на первых этапах создания двигателя).

7. Проектирование и доводка эжектора для рассматриваемой задачи имеет определенную специфику. В момент проведения расчётных работ по эжектору, как правило, еще окончательно не определено конструктивное лицо узлов и систем двигателя, так что в процессе

доводки двигателя не исключено изменение не только размеров, но и модели эжектора. При доводке двигателя могут быть изменены, например, конструкция или тип уплотнений масляных полостей опор (а следовательно, будет иной расход пассивного газа), количество ступеней вентилятора или компрессора, конструкция дренажного бачка, схема суфлирования масляных полостей двигателя и т.п. Так, например, двигатель НК-144 был вначале спроектирован с двухступенчатым вентилятором. Для него был рассчитан эжектор с диаметром критического сечения сопла активного газа $d = 7,5$ мм и камерой смешения $D = 18$ мм. Однако в процессе доводки с целью повышения газодинамической устойчивости компрессора в конструкцию двигателя была введена третья ступень вентилятора. В связи с этим, противодействие на выходе из камеры смешения эжектора возросло, увеличился расход воздуха через уплотнения, поэтому пришлось увеличить относительную площадь критического сечения сопла активного газа и диаметр камеры смешения ($d = 8,8$ мм, $D = 20$ мм).

Доводка эжектора считается законченной после набора достаточного количества экспериментальных данных, подтверждающих работоспособность его окончательной модели определённой размерности во всех ожидаемых условиях эксплуатации двигателя.

Для сведения в табл. 3 приведены данные, характеризующие основные геометрические размеры эжекторов (в мм), используемых в системах суфлирования опор компрессора ТРДД семейства «НК». Кроме того, ниже приведена информация, относящаяся к геометрическим размерам трубопроводов, подводящих активный и пассивный воздух к этим эжекторам.

Таблица 3

Двигатель	d	D	l	L
НК- 8-2У	7,4	15,5	109	199
НК- 86	7,2	18	135	210
НК - 22	8,8	20	138	210
НК - 25	8,5	23	148,5	230
НК - 32	9,2	27	176	300

Подвод активного воздуха от компрессоров к эжекторам этих двигателей произведен трубопроводами с внутренним диаметром 14 мм, а для подвода пассивного воздуха от суфлёров к эжекторам у двигателей НК-8-2У и НК-86 использован трубопровод диаметром 14 мм, у двигателей НК-22 и НК-25 - диаметром 20 мм, а у двигателя НК - 32 – диаметром 25 мм.

8. Газовый эжектор, используемый в системе суфлирования, при работе двигателя на определённом режиме практически обеспечивает постоянство объёмного расхода воздуха через рабочее колесо суфлёра. Но при этом необходимо учитывать, что по величинам расхода воздуха, прорывающегося в масляные полости опор, неизбежно будет иметь место большой разброс. Так, при высокой герметичности уплотнений эжектор будет создавать в масляных полостях суфлируемых опор разрежение, а при прорыве в эти полости повышенного расхода воздуха давление в системе суфлирования будет увеличиваться, и не исключено, что его уровень сможет превысить допустимые нормы. В связи с этим, чтобы исключить возможность выхода за пределы установленных норм как по величине разрежения, так и по уровню давления в масляных полостях опор, в состав системы суфлирования необходимо ввести два клапана: вакуумный, ограничивающий возможность возникновения повышенного разрежения, и предельный, обеспечивающий возможность удаления из системы нерасчётного количества воздуха, прорвавшегося через уплотнения масляных полостей. В ОАО «СНТК им. Н.Д. Кузнецова» была разработана система суфлирования, обеспечивающая выполнение

всех этих условий. Она использована на двигателе НК- 25. В этой системе на выходе из суфлёра опоры компрессора предусмотрен вакуумный клапан, а на маслобаке установлен предельный (предохранительный) клапан. Вакуумный клапан обеспечивает подсос воздуха из атмосферы в том случае, если в масляных полостях будет повышенное разрежение (при высокой герметичности уплотнений, т.е. при малом расходе воздуха через них). А предельный клапан открывается при превышении допустимого уровня давления, установленного в ТУ на двигатель. Но при этом, если учесть, что в случае открытия клапана на маслобаке через него может происходить выброс воздухомасляного аэрозоля или масляной пены, то более целесообразно предельный клапан установить на выходе из суфлёра, как показано на рис. 44. Такое конструктивное решение было разработано в качестве резервного для системы суфлирования опор компрессора двигателя НК-25.

Следует отметить, что при установке предельного клапана на выходе из суфлера практически отпадает необходимость в предохранительном клапане маслобака. Более того, если учесть, что через рассматриваемый предельный клапан будет удаляться из системы очищенный от масла воздух, а через предохранительный клапан маслобака при его открытии может происходить потеря масла, то, очевидно, что предпочтение следует отдать использованию предельного клапана на выходе из суфлёра.

В принципе, такое решение может быть использовано при любой схеме системы суфлирования. Но при этом необходимо учесть, что предельный клапан на выходе из суфлера будет неэффективен только в том случае, если происходит «запирание» самого суфлера (резкое увеличение гидравлического сопротивления агрегата из-за нерасчетного повышения концентрации масла на входе в его рабочее колесо). Если же суфлер имеет большой запас по пропускной способности, то рассматриваемый предельный клапан будет работать эффективно, выпуская из системы дополнительное количество прорвавшегося в масляные полости воздуха.

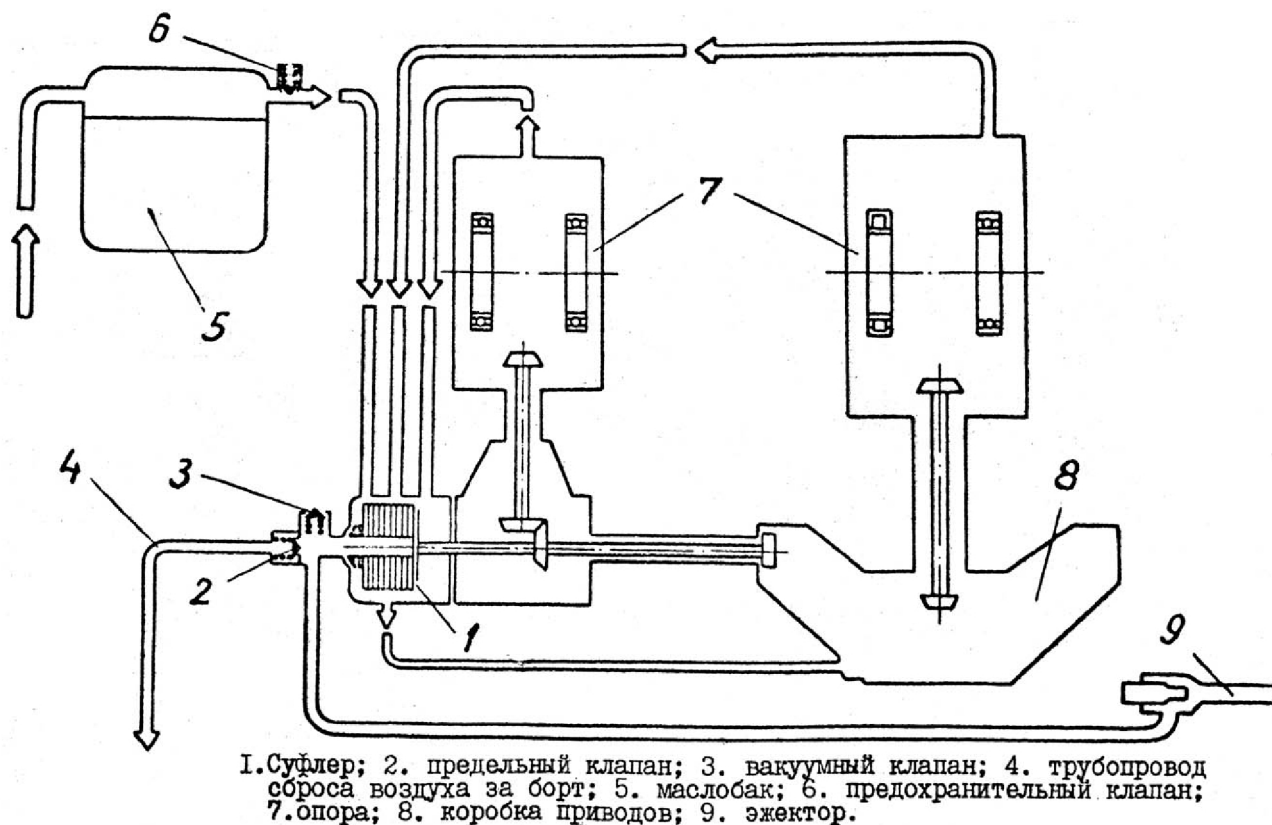


Рис. 44. Схема системы суфлирования с блоком клапанов у двигателя НК-25

9. При проектировании систем суфлирования с использованием газового эжектора необходимо учитывать следующие обстоятельства.

Описанная схема суфлирования эффективна применительно только к таким ГТД, у которых в масляных полостях опор использованы малорасходные контактные уплотнения. Это связано с тем, что при расчётном расходе суфлируемого воздуха более 40 г/с габариты эжектора становятся неприемлемо большими (особенно увеличивается длина камеры смешения) и, главное, требуется большой расход активного воздуха, что делает применение рассмотренной схемы нецелесообразным.

Относительно одновременного использования общего эжектора и для опорожнения дренажного бачка следует иметь в виду, что такое решение является конструктивным только для двигателей дозвуковых самолётов (с расчётной высотой полёта до 13 км). А у двигателей сверхзвуковых самолётов, летающих на высотах 15-20 км, для системы дренажа необходимо иметь автономный эжектор. Это связано с тем, что на больших высотах для нормальной откачки масла в масляных полостях опор требуется поддерживать повышенное избыточное давление, что автоматически исключает возможность параллельного использования эжектора системы суфлирования для опорожнения дренажного бачка. Так, например, у двигателей НК-25 и НК-32 для системы дренажа предусмотрен специальный малогабаритный эжектор, эффективность которого проверена в процессе многолетней его эксплуатации.

12. Выбор пропускной способности системы суфлирования

Повышение давления в системе суфлирования сверх допустимого значения в результате нарушения нормальной работы уплотнений масляной полости приводит к возникновению следующих дефектов:

- 1) течь масла через уплотнения и прорыв горячих газов в масляную полость;
- 2) выброс масла через предохранительный клапан маслобака;
- 3) ухудшение эффективности маслоотделения в суфлёре;
- 4) «запирание» каналов в рабочем колесе суфлера;
- 5) «запирание» каналов суфлирования масляных полостей.

«Запирание» суфлёра – это явление (кратко описанное в разделе 3), при котором масло, и поступающее в суфлёр и отсепарированное, скапливается в корпусе агрегата (на периферии рабочего колеса суфлёра), и при этом, за счёт возрастания местной объёмной концентрации масла, создаются условия для снижения уровня скорости распространения звука в воздухомасляной смеси (которая может быть на порядок меньше её величины для чистого воздуха). При сохранении заданной величины расхода смеси происходит резкий рост давления перед суфлёром, приводящий к увеличению плотности среды на входе в суфлёр. Поэтому для снижения этого давления потребуется увеличивать соответствующие проходные сечения.

Аналогично может происходить «запирание» каналов отвода смеси из масляных полостей опор при достижении в каком-либо узком сечении скорости звука. И здесь также для того, чтобы создать возможность пропуска через них повышенного расхода воздухомасляной смеси (при допустимом уровне давлений в масляных полостях), необходимо будет увеличивать площади проходных сечений в соответствующих каналах.

В связи с этим, для обеспечения надёжного функционирования масляной системы даже при определённом нарушении нормальной работы одного из уплотнений валов (приводящем к повышенному расходу воздуха через него) проходные сечения в каналах и агрегатах системы суфлирования при её проектировании необходимо выбирать с учётом требуемой избыточности по пропускной способности.

В процессе создания двигателя при исследовании системы суфлирования необходима проверка избыточности пропускной способности суфлера совместно с магистралью, по которой из него отводится воздух, очищенный от масла.

Как было отмечено, в соответствии с требованиями отраслевого стандарта [12] величина коэффициента этой избыточности при использовании лабиринтных уплотнений должна составлять не менее 1,5, а при контактных – не менее 2,5.

Коэффициент избыточности $K_{изб}$, используемый для количественной оценки запаса пропускной способности системы суфлирования, определяется по формуле $K_{изб} = \frac{G_{np}}{G_{упл}}$,

где G_{np} – предельно допустимый расход воздуха в системе суфлирования;

$G_{упл}$ – расход воздуха через максимально изношенные уплотнения.

Предельно допустимым расходом воздуха в исследуемой системе суфлирования является такой расход, при котором величина давления в системе суфлирования достигает максимального нормированного значения.

Для определения величины предельно допустимого расхода воздуха целесообразно воспользоваться построенной по результатам испытания графической зависимостью давления в системе суфлирования от расхода воздуха через суфлёр.

Давление в объединенной системе суфлирования, в которой масляные полости двигателя гидравлически связаны между собой, допускается контролировать в одной характерной точке. В качестве такой контрольной точки выбирают входную полость суфлёра или масляную полость коробки приводов.

При выборе максимально допустимого уровня давления в системе суфлирования, должны быть учтены следующие факторы:

- 1) максимально допустимая величина давления в масляной полости коробки приводов, при которой обеспечивается герметичность уплотнений рессор приводов агрегатов;
- 2) настройка давления открытия предохранительного клапана маслобака;
- 3) минимально допустимый перепад давления на масляных форсунках.

В процессе испытания проверяется соответствие заданного значения максимально допустимого давления в системе суфлирования фактическому. Если оно не указано в технической документации, то проводят его определение. При этом основным критерием нормальной работы масляной системы при повышении давления в системе суфлирования является отсутствие расхода масла выше норм, заданных в технических условиях (ТУ) на двигатель.

Для имитации работы двигателя с максимально изношенными уплотнениями масляных полостей уплотнения должны быть собраны с максимально допустимыми по ТУ зазорами. В случае затруднений с указанной сборкой допускается использовать статистические данные о расходе воздуха, полученные при длительных стендовых испытаниях.

Фактическое максимальное значение расхода воздуха через систему суфлирования G_{np} , при котором давление в ней достигает максимального уровня, устанавливается при работе двигателя на максимальном режиме. Экспериментальная проверка производится в соответствии с методическими указаниями [13].

Зависимости давления в системе суфлирования от расхода воздуха, через суфлер приведенные на рис. 45.

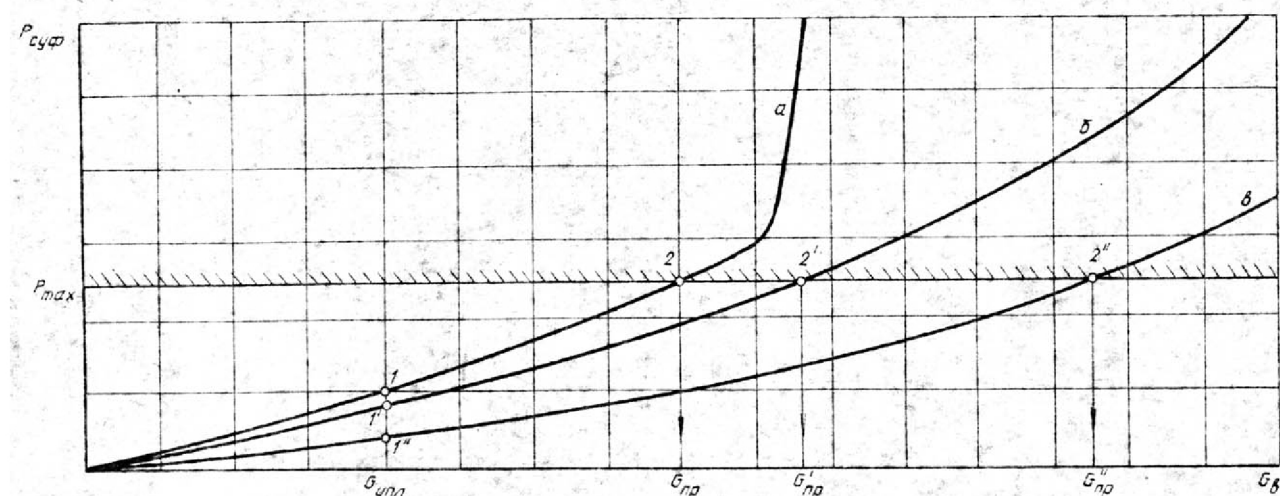


Рис. 45. Виды гидравлических характеристик суфлёров

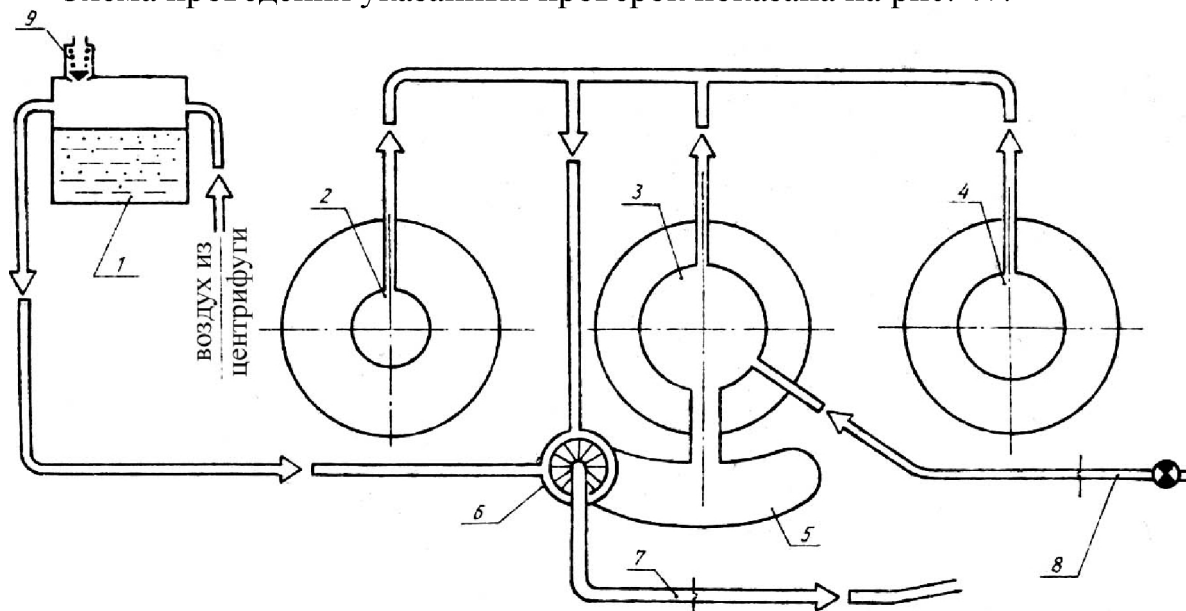
Кривые a , b и c соответствуют возможным вариантам зависимости величины давления в системе суфлирования от расхода воздуха через суфлер, причем вид кривой a свойственен случаю «запирания» суфлера.

Точка 1 соответствует значению наибольшего расхода воздуха через уплотнение $G_{упл}$ в масляную полость опор, установленному при работе двигателя на максимальном режиме.

Значение предельно допустимого расхода воздуха G_{np} через систему суфлирования фиксируется при достижении давления в системе суфлирования максимально допустимого уровня (точка 2). Таким образом, коэффициент избыточности исследуемой системы находится как отношение расхода воздуха в точке 2 ($2', 2''$) гидравлической характеристики к расходу воздуха в точке 1 ($1', 1''$). На рис. 46 показана схема, используемая при проверке избыточности системы суфлирования.

Метод определения запасов пропускной способности системы суфлирования включает два вида проверок, с целью выявления критических условий работы данной системы путём дополнительного вдува воздуха в масляную полость средней опоры (имитация раскрытия уплотнений) и подача избыточного количества масла в суфлёр. Так, например, у двигателя НК-32 экспериментально было установлено, что по воздуху запас пропускной способности системы суфлирования составил 3,4...4,8. А при дополнительной подаче масла в трубы суфлирования до 25 л/мин суфлёр работает нормально, залива маслом рабочего колеса суфлёра не произошло.

Схема проведения указанных проверок показана на рис. 47.



1. масляный бак; 2,3,4. опоры; 5. коробка приводов; 6. суфлёр; 7,8. расходомерные устройства; 9. предельный клапан

Рис. 46. Схема проверки избыточности системы суфлирования при вдуве дополнительного расхода воздуха в масляную полость

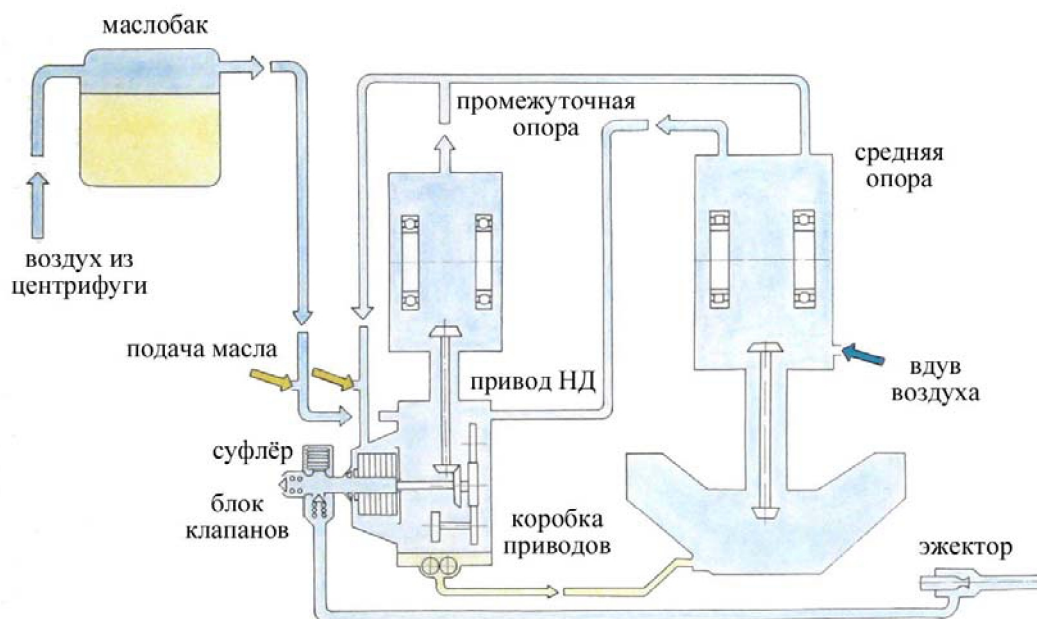
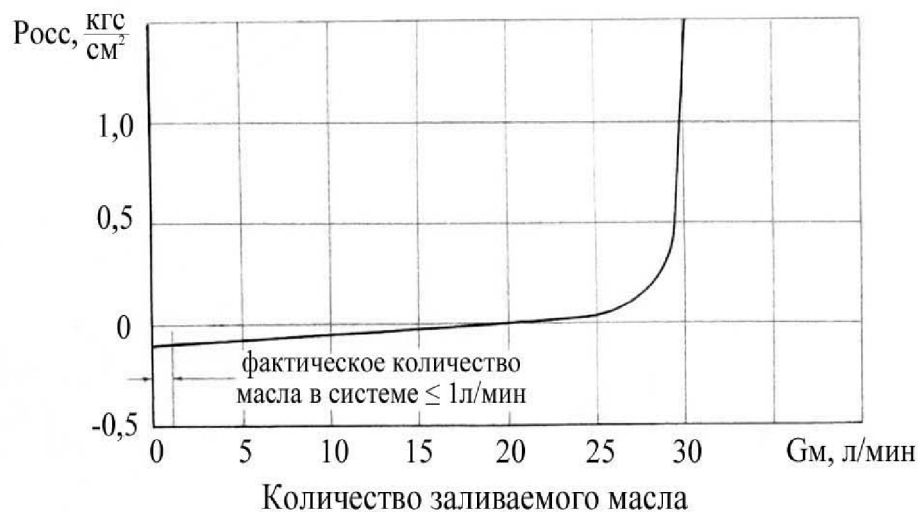


Рис. 47. Схема проверки функциональной избыточности системы суфлирования двигателя НК-32

Результаты этих проверок представлены на рис. 48

**а) определение граничных условий
“запирания” суфлёра по маслу**



б) определение гидравлической характеристики по воздуху

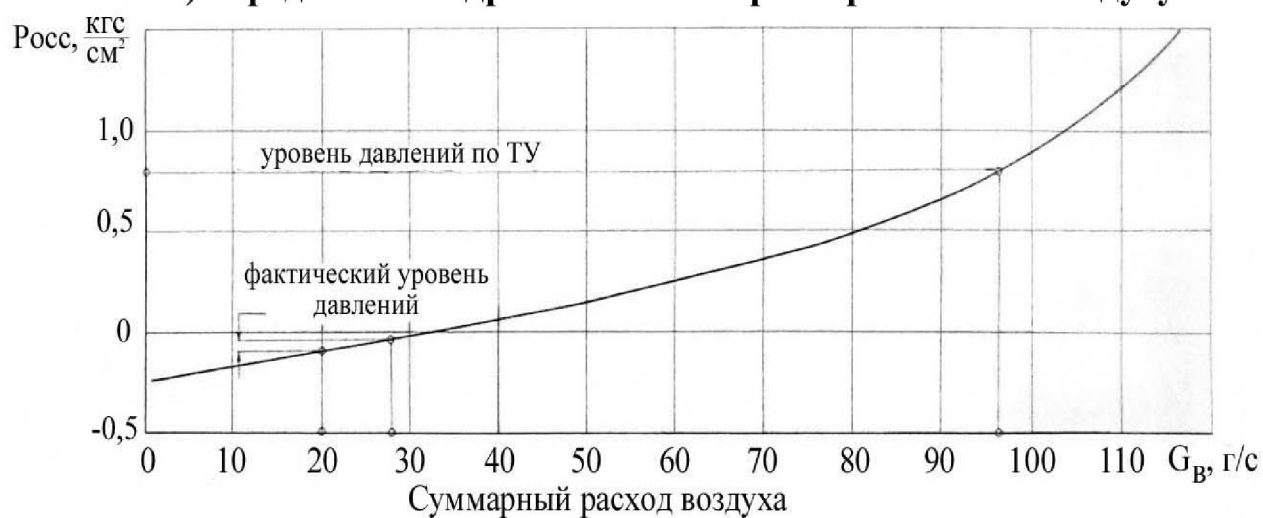


Рис. 48. Проверка запасов по пропускной способности

13. Взаимодействие масляной системы и системы суфлирования

Как известно, при работе любой системы должно быть обеспечено её согласованное взаимодействие с другими системами двигателя. Так, система суфлирования функционально взаимодействует с системой наддува уплотнений масляных полостей опор ротора и с масляной системой. При этом по сравнению с системой наддува уплотнений у масляной системы взаимодействие с системой суфлирования отличается значительным многообразием.

1. В откачиваемой из узлов двигателя масловоздушной смеси содержится большая объёмная доля воздуха (от 50 до 90%). Этот воздух необходимо отделять от масла перед поступлением последнего на вход в нагнетающий насос. Сепарацию откачиваемой масловоздушной смеси производят либо в приводном центробежном воздухоотделителе (центрифуге), либо в статическом устройстве. Но, независимо от типа используемого воздухоотделителя, из него воздух поступает в систему суфлирования.

2. При сепарации воздухомасляной смеси в суфлёре масло, отделённое от воздуха, возвращают в циркуляционный контур масляной системы. В том случае, если рабочее колесо суфлёра размещено внутри коробки приводов или масляной полости опоры, возврат отсепарированного масла в масляную систему происходит автоматически. Если же суфлёр выполнен в виде отдельного приводного агрегата, то из него осуществляется слив масла самотёком в коробку приводов, а в случае невозможности такого конструктивного решения внутрь корпуса суфлёра встраивают небольшой откачивающий насос (рис. 28).

3. Система суфлирования, формируя определённые давления в масляных полостях опор, влияет на распределение прокачки масла по узлам двигателя. Как известно, уровень давлений в масляных полостях опор двигателей может быть различен. Так, например, у двигателей семейства «НК» распределение давлений по опорам, как правило, таково: в передней опоре поддерживается разрежение, в средней опоре давление околонулевое, а в опоре турбины – до 0,2 МПа, давление масла за нагнетающим насосом обычно 0,4 МПа. Так как необходимо обеспечить дифференцированную раздачу масла по опорам в соответствии с тепловыделением в них, то система разводки масла по узлам и форсуночная сеть в каждой из опор должны быть выбраны с учётом располагаемых разностей давлений ($\Delta p = p_{м.вх} - p_{опоры}$).

4. Уровень давления в маслобаке зависит от схемы суфлирования масляных полостей двигателя. Так, например, у двигателя НК-8-2У маслобак открыт и не связан с полостями опор. А у других двигателей, где маслобак непосредственно участвует в процессе суфлирования, нерасчётное повышение давления в нём может привести к его деформации и разрушению. Поэтому на маслобаке устанавливают предохранительный клапан. При этом конструкция маслобака должна иметь достаточный запас прочности при действии знакопеременных нагрузок по величине давления на внутренние поверхности его стенок: в воздушной полости маслобака возможно не только давление, но и разрежение.

5. Для обеспечения нормальной подачи и откачки масла в высотных условиях необходимо обеспечить в масляных полостях опор и маслобака величину абсолютного давления не менее 30 кПа (с целью исключения возможности возникновения кавитационных режимов в работе насосов). Поддержание такого давления в масляных полостях двигателя производят за счёт создания подпора на выходе из суфлёра. В качестве возможной меры повышения высоты насосов в зону на выходе из суфлёра можно осуществить подвод воздуха из компрессора двигателя (для создания противодавления).

5.1. У двигателей, эксплуатируемых на высотах более 15 км, обычно используют баростатический клапан, который с подъёмом на высоту постепенно прикрывает проходное сечение в канале выхода воздуха из суфлёра.

На выходе из суфлёра опор компрессора двигателя НК-32 установлен блок клапанов. Он представляет собой совокупность конструктивно расположенных в одном корпусе трёх клапанов (рис. 49): баростатического, вакуумного и предельного. Использование баростатического клапана позволяет обеспечить требуемую высотность системы.

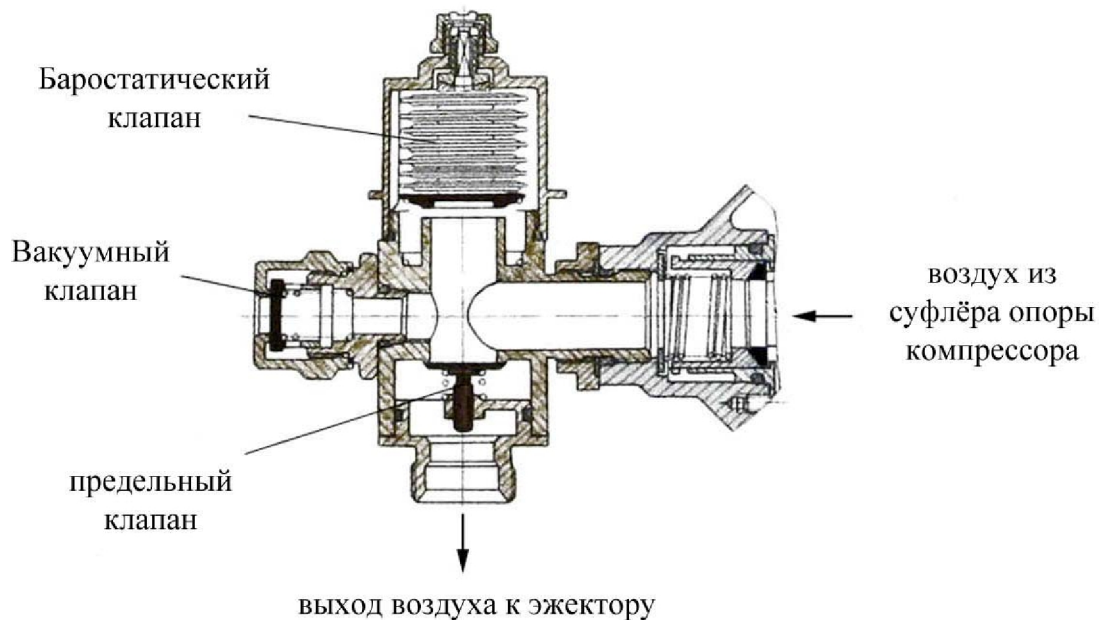


Рис. 49. Блок клапанов двигателя НК-32

Ниже показан характер движения воздуха в блоке клапанов в земных (рис. 50, а) и в высотных условиях (рис. 50, б).

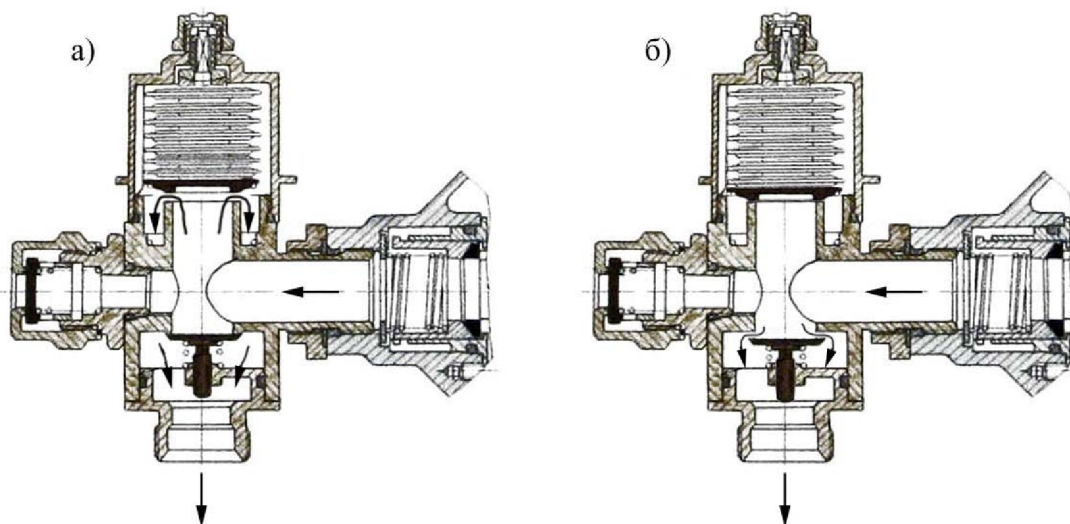


Рис. 50. Рабочее положение клапанов в земных (а) и в высотных (б) условиях

5.2. Следует отметить, что с помощью эжектора в системе суфлирования также возможно формировать требуемый уровень давления, т. е. можно «управлять» гидравлической характеристикой системы суфлирования.

В системе суфлирования с использованием эжектора на входе пассивного воздуха в него в некоторых случаях в земных условиях создают статическое давление примерно в

1,5...2,5 раза ниже атмосферного. За счет этого появляется возможность допустить более высокие гидравлические потери в отводном трубопроводе, т. е. уменьшить его диаметр, а величина статического давления пассивного воздуха на входе в эжектор должна быть выше атмосферного давления. Это обеспечивается за счет соответствующего выбора геометрической модели и размеров эжектора.

В качестве примера на рис.51 в виде заштрихованной зоны для земных и высотных условий приведены статистические экспериментальные данные по величинам давления в масляной полости средней опоры двигателя НК-144 (который был установлен на сверхзвуковом самолёте ТУ-144). Как видно, с набором высоты уровень давления в системе суфлирования понижается, но абсолютное его значение не опускается ниже атмосферного давления на высоте $H=11$ км. А при выходе самолета на сверхзвуковые скорости давление в системе суфлирования скачкообразно повышается (так как за счёт газодинамического торможения потока резко возрастает давление на входе в двигатель и в его тракте).

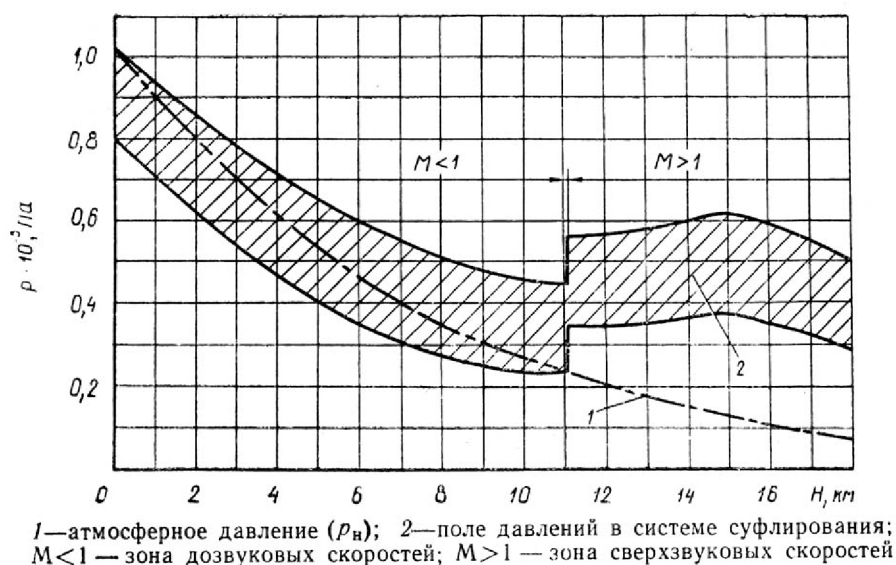


Рис. 51. Уровень давления, поддерживаемый в системе суфлирования эжектором

Таким образом, рис. 51 иллюстрирует, что в системе суфлирования с использованием эжектора нет принципиальной необходимости устанавливать на выходе из суфлера баростатический клапан или создавать специальный «подпор» за счет подвода наддувающего воздуха (от компрессора) в канал на выходе из суфлера.

14. Основные принципы проектирования систем суфлирования авиационных ГТД

Анализ опубликованных материалов по системам суфлирования отечественных и зарубежных ГТД, а также обобщение накопленного опыта проектирования, доводки и эксплуатации двигателей, созданных под руководством Генерального конструктора Н.Д. Кузнецова, позволили сформулировать общие требования, предъявляемые к системам суфлирования авиационных двигателей:

- надёжное функционирование системы (стабильность и безотказность работы в процессе эксплуатации - исключение при большой наработке двигателя течи масла через уплотнения масляных полостей опор, особенно передней, отсутствие отложений кокса в трубах суфлирования опоры турбины и др.);

- конструктивно-весовое совершенство её элементов (простота схемы суфлирования масляных полостей, минимальная масса агрегатов системы суфлирования и маслобака, компактность коммуникаций минимальное количество труб суфлирования в наружной обвязке двигателя, применение высокоэффективных суфлёров и рациональное их размещение);

- минимальные эксплуатационные потери масла (снижение расхода воздуха через уплотнения масляных полостей опор, обусловленное схемой системы суфлирования; высокая степень очистки этого воздуха от распылённого в нём масла; снижение потерь на испарение масла в системе);

- осуществление отвода воздуха из системы в пожаробезопасную зону;
- исключение возможности попадания в трубы суфлирования посторонних предметов;
- исключение льдообразования или другого рода заужений проходных сечений каналов системы суфлирования;

- отсутствие замасливания поверхностей мотогондолы и обшивки самолёта в зоне сброса воздуха из системы.

Система, полностью удовлетворяющая перечисленным требованиям, отличающаяся высоким совершенством, обеспечивающая удобство в эксплуатации и простоту в доводке, является рациональной. Анализ показал, что в основу проектирования такой системы должны быть заложены определённые принципы, перечисленные ниже.

1. Автономное суфлирование всех (или большинства) опор.

Для исключения утечек масла через уплотнения масляных полостей необходимо, чтобы в случае автономного суфлирования полостей опор также существенно упрощается доводка масляной системы и повышается надёжность в каждой масляной полости было ниже, чем давление воздуха, наддувающего уплотнения. При автономном суфлировании масляной полости отдельной опоры величина давления в ней не будет зависеть от уровня давления в полостях других опор. В наибольшей мере это важно для передней опоры двигателя: практика эксплуатации авиационных ГТД, у которых масляная полость передней опоры соединена гидравлическим каналом с полостями других опор, показала, что при повышении давления в последних (вследствие износа или раскрытия их уплотнений) могут проявляться случаи течи масла через уплотнения передней опоры, перед которыми уровень давления наддувающего воздуха сравнительно низок. В ность работы двигателя.

2. Поддержание высокого давления в масляной полости опоры турбины

Как известно, интенсивность испарения масла уменьшается с ростом давления. Если учесть,

что опора турбины является наиболее нагретым узлом системы смазки, то повышение давления в её масляной полости – прямой путь уменьшения потерь испаряемого масла.

К тому же повышение давления в масляной полости (до $2 \div 3 \cdot 10^5$ Па) дает возможность уменьшить расход воздуха через уплотнения опоры.

3. Обеспечение незначительного избыточного давления в маслобаке и коробке приводов (не более $0,5 \cdot 10^5$ Па).

При низком уровне давления в маслобаке его конструкция может быть выполнена тонкостенной, лёгкой. А в коробке приводов при низком уровне давления нетрудно обеспечить герметичность уплотнений приводных валов. Оба фактора способствуют повышению конструктивно-весового совершенства двигателя. Но при этом следует учитывать, что величина абсолютного давления в коробке приводов должна быть достаточной для обеспечения требуемой высотности её откачивающего насоса.

4. Суфлирование только откачивающими насосами масляных полостей опор, имеющих одно уплотнение.

Этим обеспечивается автономное суфлирование конкретной масляной полости, а кроме того, достигается ограничение расхода воздуха, проникающего через её уплотнения.

5. Использование для многоопорного ГТД в системе суфлирования двух и более центробежных суфлеров, преимущественно радиального типа.

Приводные центробежные суфлеры радиального типа обеспечивают наиболее эффективную сепарацию воздухомасляной смеси в системе суфлирования, при этом в случае использования нескольких суфлеров потери неотсепарированного масла уменьшаются.

6. Размещение рабочих колес суфлеров преимущественно в масляных полостях опор и коробок приводов.

Компактность системы суфлирования, количество суфлирующих трубопроводов и их диаметры прежде всего зависят от числа суфлеров, предусмотренных в двигателе, и места их установки. Размещение рабочих колес непосредственно в масляных полостях опор или коробок приводов позволяет исключить необходимость в прокладке трубопровода, соединяющего конкретную масляную полость с суфлером. А надо отметить, что в этих трубах скорость воздухомасляной смеси обычно не превышает 30 м/с, поэтому потребный диаметр труб суфлирования при больших расходах смеси велик. При более высоких скоростях в трубах суфлирования возможно «запирание», и такое явление, например, встретилось в процессе доводки двигателя НК-25. Известно, что для двухфазных смесей характерна низкая скорость распространения звука. Однако применительно к воздухомасляным смесям до сих пор соответствующие исследования не проведены. Поэтому для каждого вновь создаваемого двигателя потребуются соответствующие экспериментальные проверки.

Для труб, отводящих от суфлера воздух, очищенный от масла, может быть допущена скорость порядка 100 м/с. Таким образом, видно, что размещение рабочих колес суфлера во внутренних полостях двигателя (в опорах или коробках приводов) – прямой путь для достижения высоких конструктивно-весовых показателей элементов системы суфлирования. При выборе места расположения рабочего колеса суфлера должна быть исключена возможность залива его маслом при эволюциях самолета. В случае размещения рабочего колеса суфлера в корпусе агрегата должна быть исключена возможность переполнения маслом внутренней полости этого корпуса.

7. Прокладка труб суфлирования масляной полости опоры турбины в затурбинной области.

Если при эксплуатации двигателя в трубах суфлирования опоры турбины произойдет отложение кокса, постепенно приводящее к заужению их проходных сечений, то возможна утечка масла из подвижных уплотнений масляной полости этой опоры, что приводит к повышению расхода масла, и к тому же пожароопасно. В связи с этим, при проектировании двигателя прокладку трубы суфлирования масляной полости этой опоры предпочтительнее осуществлять в затурбинной зоне, где температура газа ниже, чем внутри газового тракта турбины, и где значительно легче обеспечить их эффективную тепловую защиту.

8. Сброс воздуха, очищенного от масла, в газозоудушнй тракт двигателя (в зону, являющуюся пожаробезопасной и исключающую возможность попадания масла в систему кондиционирования воздуха).

Сброс воздуха из системы суфлирования в тракт двигателя позволяет исключить возможность попадания в трубы суфлирования посторонних предметов (в том числе предотвратить льдообразование в них), обеспечивает отсутствие замасливания мотогондолы и обшивки самолета, т.е. позволяет повысить надежность работы двигателя и создаёт определённые удобства в эксплуатации.

9. Система суфлирования должна иметь необходимый запас по пропускной способности.

Это требование необходимо учитывать по нескольким причинам. Во-первых, при раскрытии уплотнений увеличивается расход воздуха через них, что может приводить к «запиранию» самого суфлёра или каналов, подводящих к нему воздухомасляную смесь. Во-вторых, возможно увеличенное (нерасчетное) поступление масла к суфлёру. В третьих, в процессе работы двигателя возможно заужение проходных сечений системы суфлирования за счёт отложения кокса.

15. Выбор рациональной схемы системы суфлирования теплонапряжённого ТРДД

Исходя из сформулированных принципов, может быть выбрана рациональная схема системы суфлирования для ТРДД со смешением потоков. Предполагается, что в масляных полостях опор применяются контактные уплотнения, обеспечивающие малый пропуск воздуха.

Выбор количества опор и их расположения должен производиться с учетом обеспечения высокой надежности двигателя и, в частности, выполнения требования минимальной теплоотдачи в этих узлах и приемлемой теплонапряженности элементов их конструкции, контактирующих с маслом. Так, в двухвальном ТРДД целесообразно заложить в конструкцию двухопорный ротор высокого давления и трёхопорный ротор низкого давления. Масляную полость опоры турбины предпочтительнее спроектировать общую для обоих подшипниковых узлов, а саму опору лучше размещать в низкотемпературной зоне – за турбиной. Среднюю опору с двумя упорными подшипниками целесообразно скомпоновать между каскадами компрессора низкого и высокого давления. Таким образом, у рассматриваемого двигателя не следует предусматривать опоры за компрессором и перед первой ступенью турбины. Указанным требованиям отвечает схема расположения опор, показанная на рис. 52. Выбор рациональной системы суфлирования опор для двухвального ТРДД проведен применительно к такой схеме. По этой схеме выполнены все ТРДД семейства «НК».

Уместно отметить, что при проведении поисковых исследований по проекту «ЕЕЕ» специалисты фирм «Пратт-Уитни» и «Дженерал Электрик» в конструктивно-силовых схемах двухвальных двигателей сочли нецелесообразным размещать подшипниковые опоры вблизи от камеры сгорания. Но в отличие от схемы расположения опор, представленной на рис. 52, в их конструктивно-силовых схемах подшипниковые опоры роторов компрессора имеют общую масляную полость (т.е. передняя и средняя опоры объединены). Данная схема была реализована во всех модификациях двигателя CFM-56. Такая же конструктивно-силовая схема была заложена в проекте двигателя SaM 146, совместно разрабатываемого НПО «Сатурн» и фирмой Snekma для нового поколения регионально-магистральных самолётов.

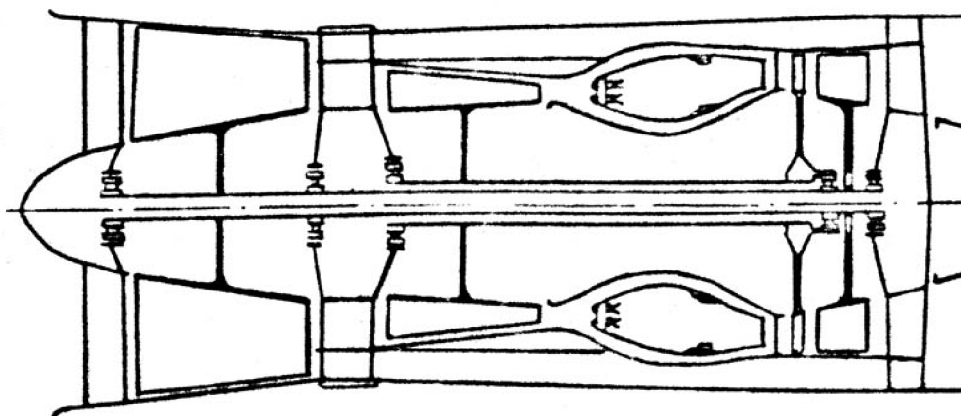


Рис. 52. Схема расположения опор двухвального ТРДД

У трёхвального ТРДД опоры турбины конструктивно вынуждены располагать между ступенями турбины. Но при этом масляную полость целесообразно выполнять общей для трёх подшипников, что значительно упрощает прокладку соответствующих коммуникаций масляной системы и системы суфлирования. Масляные полости опор нецелесообразно сообщать по межвальным каналам, так как попадание масла в валы нежелательно, во-первых, из-за увеличения площади поверхности контакта с маслом, приводящего к росту теплоотдачи в него, а во-вторых, из-за возможности появления в роторе неуравновешенных сил (особенно на режимах запуска). Выбор рациональной схемы системы суфлирования для трёхвального ТРДД со смешением потоков проведён для двигателя, расположение опор которого соответствует рис. 53. При этом предполагается, что в масляных полостях опор двигателей использованы контактные уплотнения, обеспечивающие ограниченный пропуск воздуха.

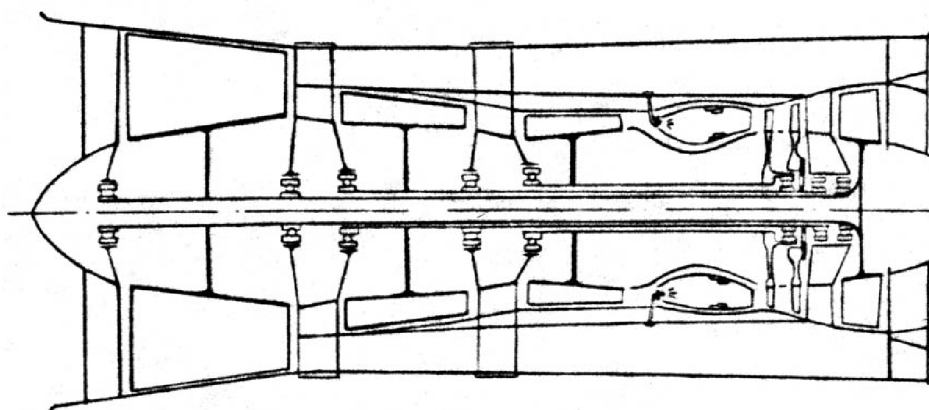


Рис. 53. Схема расположения опор трёхвального ТРДД

Основные особенности, характерные для рациональной системы суфлирования ТРДД рассматриваемых схем, следующие:

- суфлирование масляной полости передней опоры с помощью откачивающего насоса;
- автономное суфлирование масляной полости опоры турбины;
- использование в системе двух суфлеров радиального типа;
- отвод воздуха из системы суфлирования опор компрессора в наружный контур;
- отвод воздуха из суфлёра опоры турбины, установленного в масляной полости опоры или на валу ротора НД, на срез сопла.

Суфлирование с помощью откачивающих насосов на двигателях рассматриваемых кинематических схем можно осуществить только в передней опоре. Так как в масляных полостях других опор по 3...5 уплотнений, значит, обеспечить их герметичность по маслу только откачивающими насосами невозможно. Следовательно, осуществление суфлирования опор по типу двигателя «Олимп-593» здесь неприемлемо из-за опасности больших утечек масла. Рациональное суфлирование двухвального ТРДД может базироваться на схеме системы суфлирования опор двигателя НК-8-2.

Размещение суфлеров должно производиться с учетом целевого назначения двигателя и особенностей его конструкции. Так, у двигателей, предназначенных для самолетов транспортной авиации, суфлер опор компрессора целесообразно располагать внутри коробки приводов, а у двигателей для маневренных самолетов специального назначения его следует выполнять выносным. Это вызвано тем, что при резких эволюциях такого самолета в коробке приводов возможна заливка суфлера маслом. А это будет приводить к повышенному расходу масла из-за его выброса через суфлер (или клапан маслобака).

Размещение суфлера в масляной полости опоры турбины исключает возможность его заливки маслом, но такая конструкция может быть реализована только у двухвального ТРДД. Суфлер в опоре этого двигателя размещается компактно, имеет общий привод с отка-

чивающим насосом, расположенным также в корпусе опоры. Такое решение дает возможность осуществить отвод воздуха из суфлёра в наружный контур внутренним трубопроводом, проложенным в холодной зоне (через рёбра опоры турбины, продуваемые воздухом из наружного контура).

Рациональная схема суфлирования опор двухвального ТРДД, с учётом оптимального расположения суфлеров, показана на рис. 54. Такая схема реализована на двигателе НК-86.

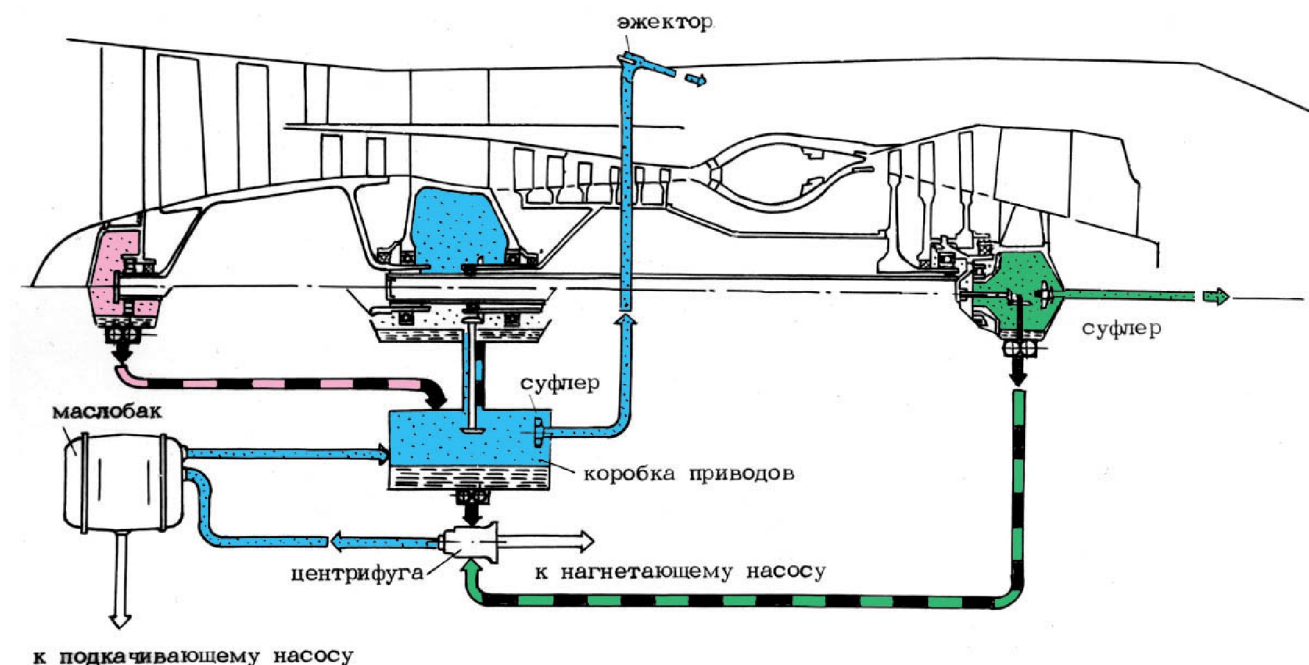


Рис. 54. Схема суфлирования масляных полостей двухвального ТРДД

У трёхвального ТРДД внутри масляной полости опоры турбины ввиду ограниченности её объёма не представляется возможным разместить суфлер. Его можно выполнить выносным, установив агрегат на коробке приводов. Но в такой схеме есть два недостатка. Во-первых, трубы суфлирования необходимо выводить наружу, усложняя обвязку двигателя; во-вторых, они проходят через высокотемпературную зону газового тракта, а тепловая защита этих труб - сложная задача.

Так, например, у двигателя НК-25 с максимальной температурой газа перед турбиной около 1200 °С опора турбины расположена в высокотемпературной зоне (рис. 55). При этом радиальные трубы подвода масла к подшипникам, слива масла из опоры и трубы суфлирования масляной полости опоры турбины проходят внутри полых сопловых лопаток третьей ступени турбины (рис. 56).

Предпочтительнее осуществлять суфлирование такой опоры турбины через полый вал ротора низкого давления. Центробежный суфлёр радиального типа при этом располагается непосредственно в валу, а отвод воздуха из него осуществляется с помощью внутреннего трубопровода со сбросом в низкотемпературную зону внутри стекателя. Следует отметить, что реализация такого способа суфлирования опоры турбины таит в себе большие потенциальные возможности обеспечения высокой надёжности работы системы смазки теплонапряжённой опоры. Рациональная схема суфлирования опор трёхвального ТРДД со смешением потоков показана на рис. 57.

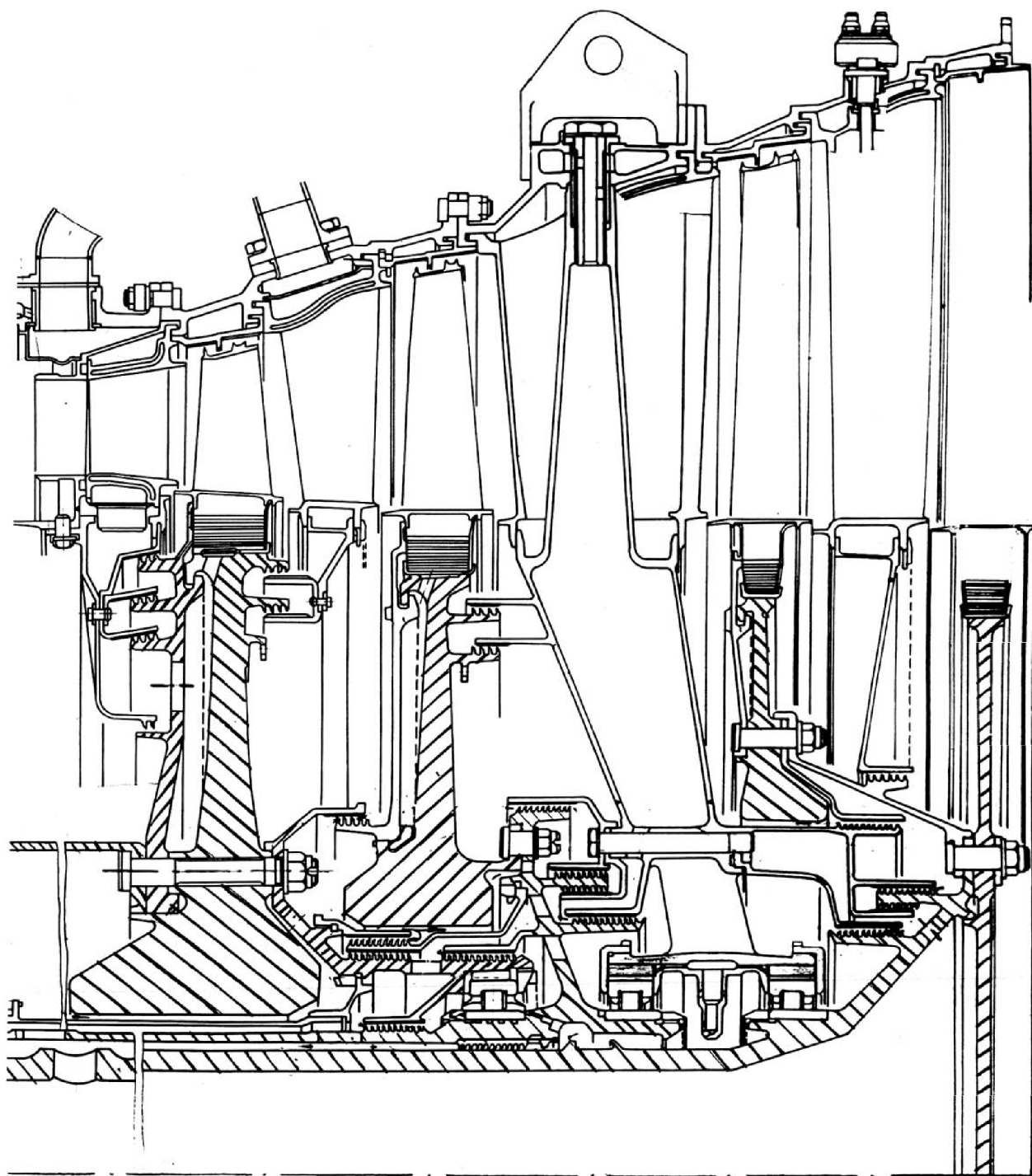


Рис. 55. Турбина двигателя НК-25

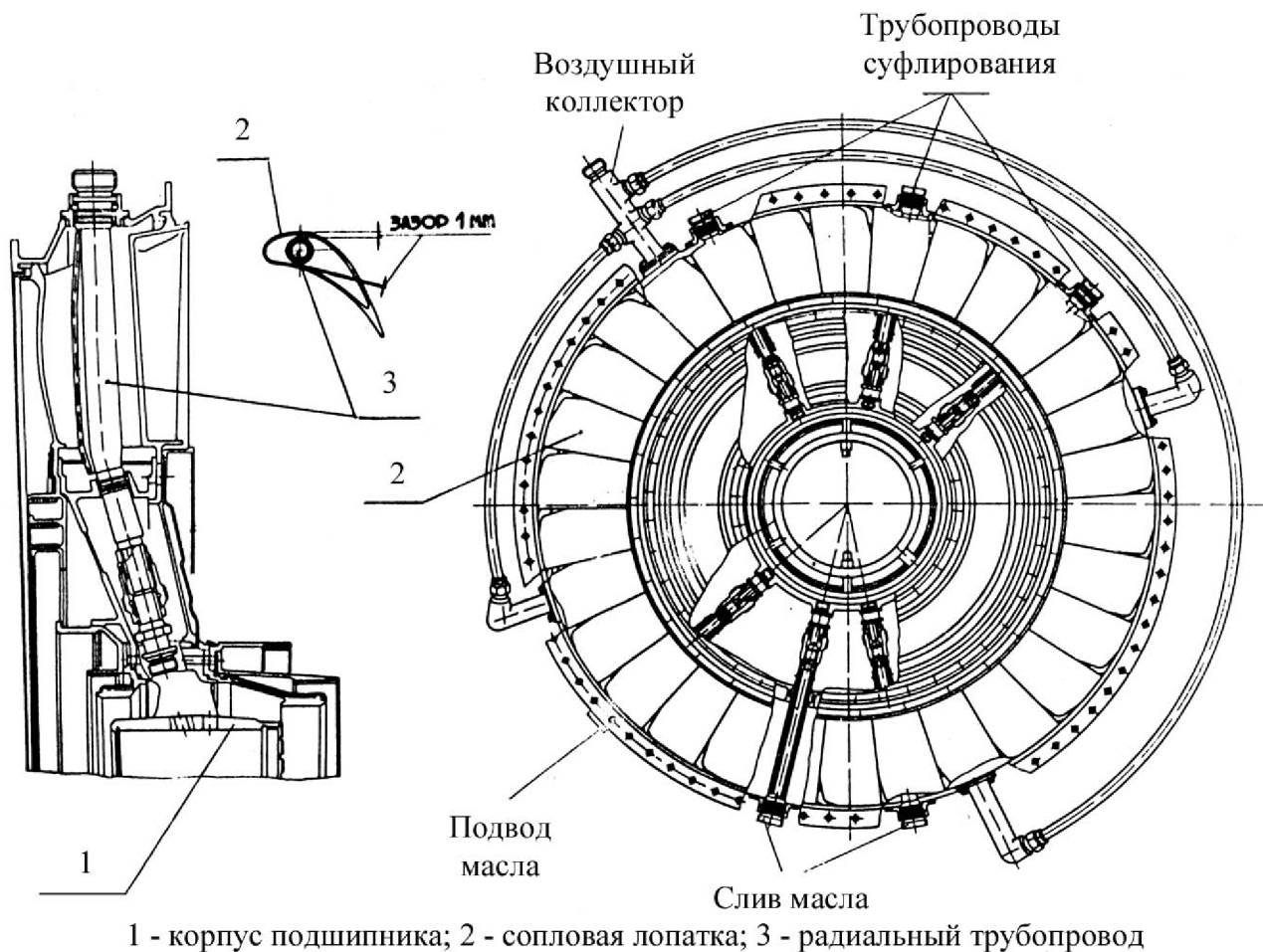


Рис. 56. Опора турбины

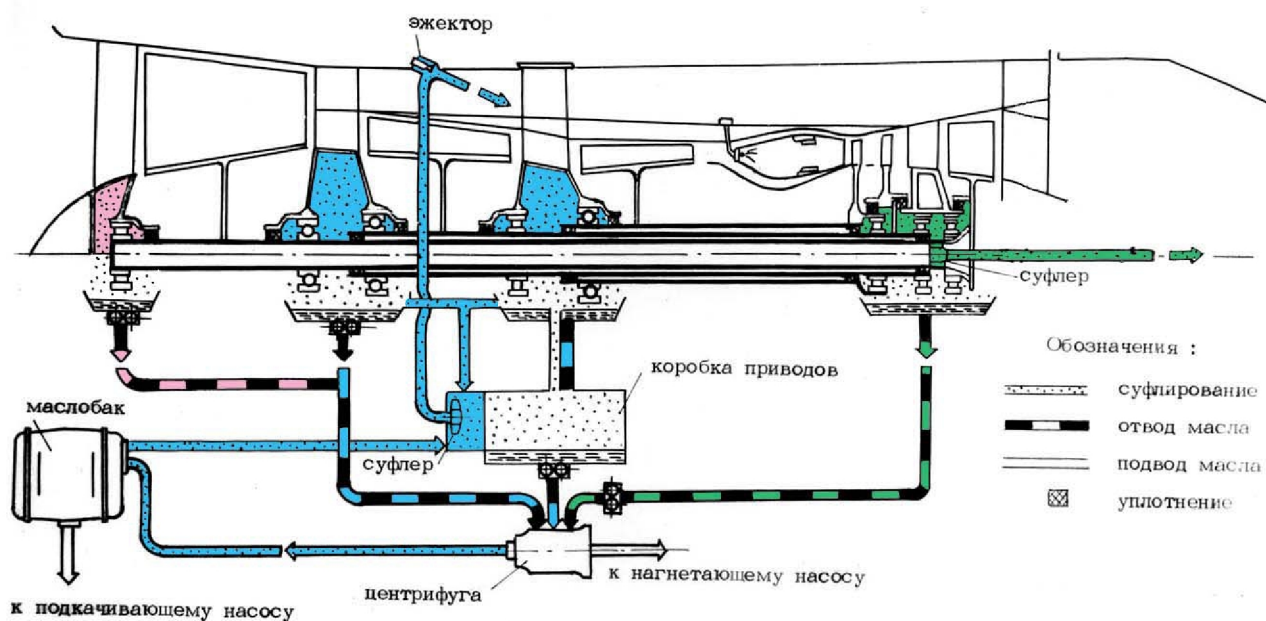


Рис. 57. Схема суфлирования масляных полостей трёхвального ТРДД

16. Порядок проектирования системы суфлирования

В основу проектирования системы суфлирования авиационного ГТД должен быть положен ряд исходных условий:

- выбрана конкретная конструктивно-силовая схема двигателя, в которой задано общее количество опор роторов и подвижных уплотнений масляных полостей каждой из опор;
- известно расчётное распределение давлений и температур воздуха как в газозооном тракте турбокомпрессора, так и в его внутренних полостях (разгрузочных и предмасляных) по всем режимам работы двигателя в ожидаемых условиях эксплуатации;
- выбраны типы уплотнений между воздушными и масляными полостями опор двигателя и известны расходные характеристики этих уплотнений (в том числе и с учётом их максимального износа при больших наработках);
- установлены требования к допустимым уровням давлений в масляных полостях опор, коробок приводов и маслобака с учётом обеспечения заданной «высотности» масляной системы (оговоренные в ТЗ на разработку двигателя);
- известны требования ТЗ к допустимой величине эксплуатационного расхода масла.

Исходя из этих положений, вначале должен быть произведён предварительный выбор принципиальной схемы отвода из масляных полостей двигателя воздуха, проникающего в них через уплотнения валов. Затем необходимо произвести рациональный выбор типа используемых суфлёров и мест их установки на двигателе. После определения в первом приближении номенклатуры и геометрических размеров элементов, входящих в состав системы суфлирования, производят выбор проходных сечений каналов суфлирования масляных полостей двигателя и осуществляют эскизное проектирование соответствующей трубопроводной обвязки.

Принципиально важной особенностью системы суфлирования является то, что в ней, начиная от масляных полостей и до выхода из суфлёра, рабочее тело представляет собой двухфазную воздухомасляную смесь. А особенности течения таких смесей недостаточно изучены, к тому же в литературе отсутствуют справочные данные по их теплофизическим свойствам. Если при этом учесть, что у двухфазных смесей скорость распространения звука может быть на порядок ниже, чем у газовой компоненты, то проектирование систем суфлирования производят с использованием полуэмпирического подхода.

На основании выбранной принципиальной схемы системы суфлирования с учётом гидравлических характеристик применяемых уплотнений масляных полостей и заданных уровней давлений (в предмасляных полостях и в месте выхода воздуха из системы суфлирования) производят расчёт величин давлений в масляных полостях опор. При этом исходные данные и граничные условия расчёта должны соответствовать параметрам для взлётногo режима работы двигателя. На данном этапе расчёты допускается производить для «чистого» воздуха, исключив влияние на гидравлические потери масла, содержащегося в воздухе, удаляемом по системе суфлирования. С этой целью, например, можно использовать известную программу расчёта разветвленных течений А.Н. Слетенко [15]. В случае получения в результате расчёта неприемлемой величины перепада давления на каком-либо уплотнении (или на нескольких), следует изменить выбранные проходные сечения каналов суфлирования и повторить расчёт. Если по конструктивным соображениям расширение каналов системы суфлирования окажется невозможным, то необходимо будет пересмотреть изначально заданную величину давления наддува уплотнений, изменив место отбора воздуха по тракту компрессора, и вновь повторить расчёт до получения требуемых перепадов давления на уплотнениях

масляных полостей. После этого следует выполнить поверочные расчёты для крейсерского полёта в высотных условиях и для режима «малый газ» в земных условиях, чтобы удостовериться в достаточности перепадов давления на уплотнениях на данных режимах работы двигателя.

На основании анализа результатов выполненного расчёта, при необходимости, должен быть рассмотрен вопрос о введении в систему суфлирования (на выходе из суфлёра) клапанов, обеспечивающих поддержание в масляных полостях двигателя требуемые уровни давления.

После расчётного определения величин давлений в масляных полостях опор и требуемых размеров проходных сечений каналов системы суфлирования переходят к проектированию агрегатов, обеспечивающих сепарацию масла из отводимого воздуха (приводных и статических маслоотделителей), а также упомянутых выше элементов, регулирующих уровень давления в масляных полостях.

В двигателестроительном ОКБ работа по проектированию системы суфлирования, как правило, осуществляется следующим образом.

1. Выбор схемы суфлирования масляных полостей двигателя производят, исходя, прежде всего, из накопленного опыта проектирования, доводки и эксплуатации таких систем у ранее созданных двигателей. В случае отсутствия прототипа, следует провести анализ известных типов схем суфлирования (см. разд. 10) с целью использования одной из них в качестве исходной. При этом в первую очередь должен быть решен вопрос о месте отвода воздуха из системы суфлирования (в наружный контур ТРДД, на срез сопла или за борт самолёта). При этом в схеме отвода воздуха из масляных полостей желательно выбирать такие варианты, чтобы каналы суфлирования не проходили через «горячие» зоны газозоудного тракта, особенно в турбине. В качестве примеров может быть рассмотрен приведённый в разд. 15 выбор схемы суфлирования масляных полостей многовальных ТРДД.

2. Для выбранного варианта схемы системы суфлирования необходимо провести анализ соответствия её сформулированным основным принципам проектирования систем суфлирования (см. разд. 14).

На основании проведения такого анализа в схему суфлирования могут быть внесены определённые коррективы.

3. При выборе конструкции сепарирующих устройств в максимально возможной мере следует использовать суфлёры радиального типа. При этом желательно встраивать их внутри масляных полостей опор или коробок приводов, учитывая, что в таких случаях есть возможность упростить конструкцию корпуса суфлёра, а то и вовсе установить на полом валу одно рабочее колесо (без корпусных деталей), используя этот вал в качестве канала для отвода воздуха, очищенного от масла.

При объединённой системе суфлирования масляных полостей двигателя суфлёр должен быть размещён либо внутри коробки приводов, либо в виде приводного агрегата на коробке приводов. В последнем случае при выборе типа суфлёра определяющее значение будет иметь компактность его размещения. При стеснённых возможностях установки агрегата на коробке приводов предпочтение может быть отдано суфлёру осевого типа, имеющему меньший диаметральный размер по сравнению с суфлёром радиального типа. Но это следует рассматривать как вынужденную меру.

4. При проектировании рабочего колеса суфлёра в качестве исходных данных необходимо использовать частоту вращения его рабочего колеса, расход воздуха и концентрацию в нём масла. При этом следует иметь в виду, что более высокая частота вращения позволяет уменьшить диаметр рабочего колеса, а также упростить его конструкцию.

В соответствии с ОСТ 1 00969-80 «Системы масляные газотурбинных двигателей самолётов» суфлёр должен иметь избыточную пропускную способность по сравнению с максимально возможным расходом через изношенные уплотнения. При этом, при использовании лабиринтных уплотнений, коэффициент запаса по пропускной способности должен быть не менее 1,5, а при использовании контактных - не менее 2,5.

В случае использования рабочего колеса радиального типа, его геометрические размеры необходимо выбрать в соответствии с рекомендацией ОСТ 1 03845-76 (см. разд. 6.1.6). А в случае использования суфлёра осевого типа рекомендуемые размеры рабочего колеса должны быть выбраны по ОСТ 1 03950-79 (см. приложение).

5. При использовании выносного суфлёра, установленного на коробке приводов, скорость потока воздухомасляной смеси в каналах, соединяющих масляные полости опор с суфлёром, не должна превышать 30 м/с (с целью исключения возможности «запирания» канала вследствие низкой величины скорости звука в двухфазной среде).

На выходе из суфлёра скорость потока воздуха может иметь величину до 100 м/с.

6. При использовании эжектора для отвода воздуха из суфлёра должен быть проведён его расчёт с целью выбора оптимальных геометрических размеров, обеспечивающих требуемую производительность и соответствующие напорные характеристики. Методика расчёта эжектора приведена в разд. 9.

7. В том случае, если рабочее колесо суфлёра установлено внутри коробки приводов, место его расположения должно исключать возможность залива маслом входных каналов колеса (при эволюциях летательного аппарата). Кроме того, отсепарированное масло не должно накапливаться в зоне размещения рабочего колеса, а должно самотёком сливаться в маслосборник коробки приводов.

8. В конструкции суфлёра, выполненного в виде отдельного агрегата, должно быть учтено следующее:

- зазор между рабочим колесом и корпусом суфлёра должен быть не менее 15 мм;
- в нижней части корпуса суфлёра должен быть предусмотрен сборник отсепарированного масла;
- в состав агрегата должен входить насос, откачивающий из него масло (в том случае, если из суфлёра невозможно осуществить слив масла в коробку приводов самотёком);
- на выходе воздуха из суфлёра между ротором и статором должно быть установлено уплотнение с целью исключения утечек масла через зазор между ними; при этом целесообразно использовать полусферическое (самоустанавливающееся) контактное уплотнение, прижимаемое пружиной, а в случае применения лабиринтного уплотнения необходимо предусмотреть его наддув воздухом.

Суфлёр может быть выполнен в блоке с насосом, откачивающим масло из масляной полости соответствующей опоры, имея с ним общий привод.

9. В зависимости от назначения двигателя и нормированных пределов изменения величин давления в его масляных полостях в систему вводят «высотные» и предельные клапаны. А в случае использования эжектора, отсасывающего воздух из системы суфлирования, в схеме должен быть предусмотрен также и вакуумный клапан, который будет вступать в работу при повышенном разрежении в масляных полостях.

10. Для контроля уровня давления воздуха в масляных полостях должна быть предусмотрена возможность установки датчиков на входе воздухомасляной смеси в суфлёр. При этом особый интерес представляет контроль давления в полости суфлёра, связанной с масляной полостью коробки приводов агрегатов и маслобака. Контроль изменения этого давления может быть использован в качестве диагностического признака, характеризующего состояние уплотнений связанных с ним и масляных полостей.

11. При проектировании системы суфлирования должна быть предусмотрена возможность проверки избыточности пропускной способности, как при повышенном расходе воздуха, так и при нерасчётном увеличении поступления масла в каналы суфлирования. С этой целью должны быть предусмотрены специальные технологические элементы, позволяющие осуществлять дополнительный вдув воздуха в масляные полости опор и дополнительную подачу масла в трубопроводы перед суфлёром.

12. На случай возникновения необходимости повышения пропускной способности суфлёра должна быть предусмотрена возможность увеличения соответствующих геометрических размеров его рабочего колеса (например, ширины рабочего колеса или его диаметра).

17. Обеспечение эффективности системы суфлирования авиапроизводных энергетических установок

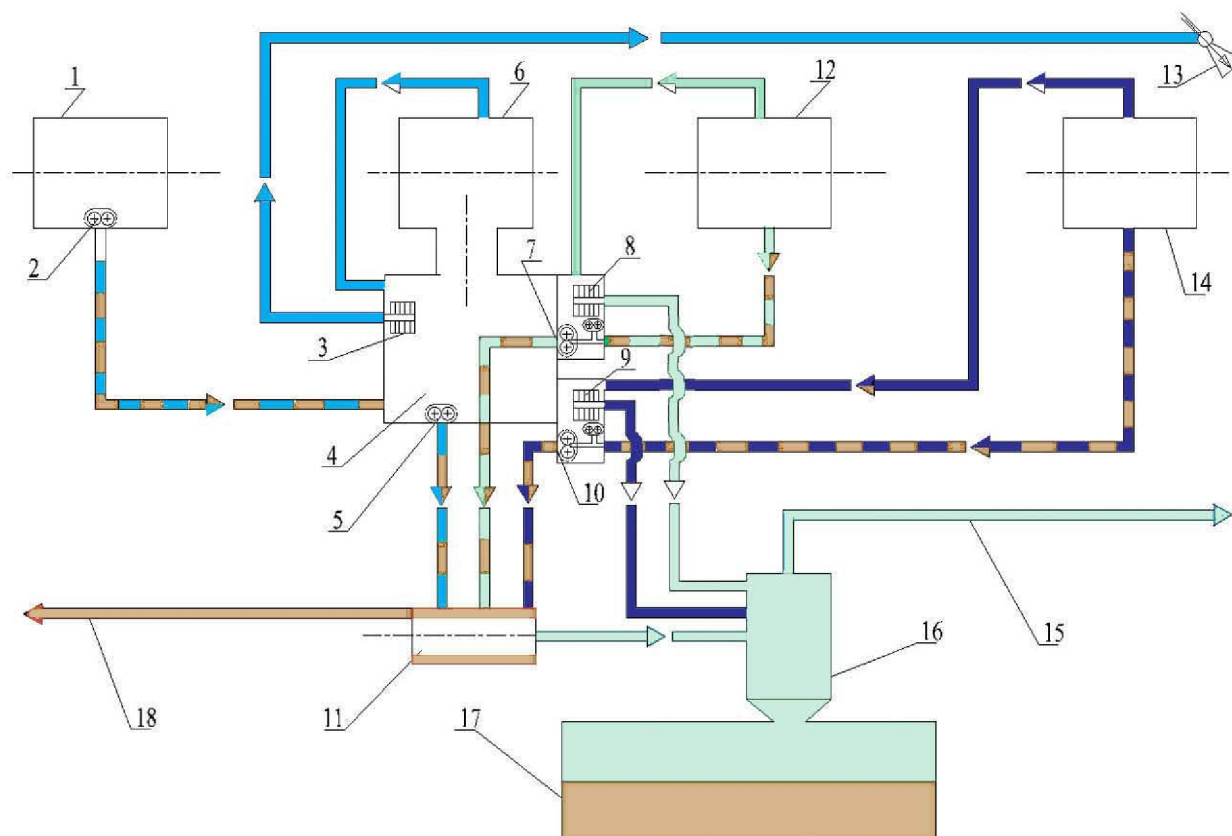
Как известно, в последнее время в промышленности получили широкое распространение так называемые авиапроизводные двигатели, используемые в качестве приводов электрогенераторов или нагнетателей газоперекачивающих агрегатов. Они представляют собой конвертированные авиационные ГТД или же являются двигателями, разработанными с учётом основных принципов создания авиационной техники для наземного использования. Очевидно, что наземное применение ГТД потребовало их адаптации к изменившимся условиям эксплуатации, характерным для таких приводов. Так, например, в масляной системе по функциональным причинам и для удобства обслуживания отдельно от двигателя были расположены маслоохладители, фильтры и масляный бак. Изменились требования и к системе суфлирования масляных полостей двигателя.

На начальном этапе практического применения авиапроизводных двигателей разработчики стремились сохранить компоновку и конструкцию агрегатов системы суфлирования авиационного прототипа. Однако с ростом требований к эффективности газотурбинных установок были проведены изменения в двигателях и его системах, расположенных вне двигателя. Так как для двигателей наземного применения, в отличие от авиационных двигателей, нет жестких требований к компактности и к массе агрегатов, появилась возможность добиться высоких эксплуатационных характеристик за счёт специальных схемных решений и установки в системе суфлирования дополнительного оборудования.

Для газотурбинного двигателя наземного применения важной технической характеристикой, влияющей на его потребительские качества, является величина эксплуатационного расхода масла. Если исключить недопустимые, в принципе, утечки масла из узлов двигателя и коммуникаций, то основной составляющей этого расхода являются безвозвратные потери масла с воздухом, отводимым из системы суфлирования. Существуют ещё утечки масла внутрь двигателя через уплотнения масляных полостей на режимах запуска, останова и на холодных прокрутках, но, учитывая малую долю таких режимов в течение ресурса двигателя, основное внимание уделяют, как правило, более эффективной сепарации масла в системе суфлирования и возврате его в циркуляционный контур. Одновременно, для предотвращения утечек масла через уплотнения валов должна быть обеспечена высокая надёжность поддержания на них требуемого перепада давления. Следует отметить, что со стопроцентной эффективностью отделить масло от воздуха и полностью исключить потери масла из системы невозможно. Поэтому перед разработчиками ставится задача снизить величину расхода масла до достижимого минимального уровня.

На газотурбинных установках, разработанных ОАО «СНТК им. Н.Д. Кузнецова», всегда уделялось должное внимание техническим решениям, повышающим эффективности системы суфлирования. Так, впервые в отрасли на двигателе НК-16СТ в систему суфлирования опор турбины газогенератора и свободной турбины был введен маслоуловитель [15]. Данный агрегат, представляющий собой статический сепаратор типа «циклон», был размещён в магистраль суфлирования за приводными суфлёрами турбин (рис. 58). Для осуществления слива отделённого масла самотёком из корпуса маслоуловителя, последний установлен на крышке маслобака. Применение маслоуловителя в потоке воздухомасляной смеси системы суфлирования опоры турбины, характеризующейся высокой концентрацией масла и температурой, позволило снизить расход масла двигателем более чем на 0,15 кг/ч. При этом следует отметить, что с точки зрения уменьшения эксплуатационных потерь маслоуловитель име-

ет важное значение для нерасчётных режимов (запуск, останов двигателя, прокрутки его ротора), на которых приводные центробежные суфлёры неэффективны.



1. Опора передняя; 2. Насос откачивающий передней опоры; 3. Суфлёр компрессора; 4. Коробка приводов агрегатов (КПА); 5. Насос откачивающий средней опоры и КПА; 6. Опора средняя; 7. Насос откачивающий опоры турбины газогенератора; 8. Суфлёр опоры турбины газогенератора; 9. Суфлёр СТ; 10. Насос откачивающий СТ; 11. Центрифуга; 12. Опора турбины газогенератора; 13. Эжектор; 14. Опора СТ; 15. Трубопровод отвода воздуха из маслоуловителя; 16. Маслоуловитель; 17. Маслобак; 18. Трубопровод отвода масла на охлаждение.

Рис. 58. Принципиальная схема суфлирования масляных полостей авиапроизводного ГТД (с двухвальным газогенератором)

Данный положительный опыт осуществления суфлирования масляных полостей был использован во всех последующих разработках двигателей «НК» наземного применения. Аналогичное устройство, установленное на крышке маслобака, было применено в системе суфлирования масляных полостей опор турбин двигателей НК-36СТ (ГПА-Ц-25), НК-38СТ (ГПА «Волга») и двигателя НК-37, служащего приводом энергетической установки мощностью 30 МВт. Следует отметить, что, с целью компенсации дополнительного гидравлического сопротивления установленных агрегатов, внутренний диаметр трубопроводов суфлирования, вынесенных за пределы двигателя, был увеличен до 50 мм, а трубопровода отвода воздуха из маслоуловителя в выхлопную шахту – до 100 мм.

На двигателе НК-36СТ с целью уменьшения концентрации масла в воздухе, поступающем к суфлёру опоры турбины газогенератора, на выходе из каналов суфлирования масляной полости этой опоры намечено установить дополнительный сепаратор (рис. 59). Кроме повышения эффективности сепарации масла, включение данного агрегата в схему масляной системы позволит существенно ограничить потери масла в случае отказа в системе откачки масла из указанной опоры.

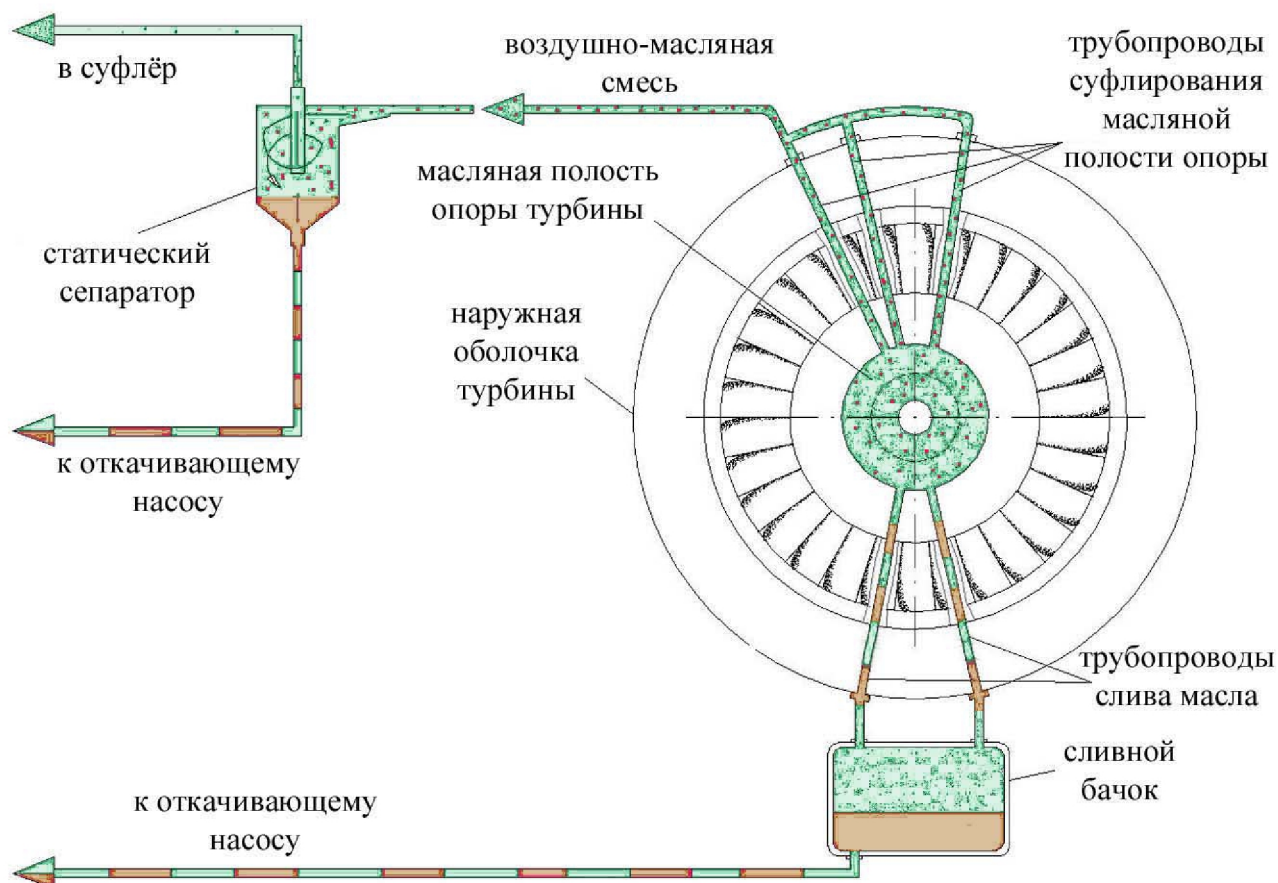


Рис. 59. Использование статического сепаратора в системе суфлирования масляной полости опоры турбины газогенератора

На современных теплонапряжённых газотурбинных двигателях, традиционно высокая температура стенок масляной полости опоры турбины газогенератора, расположенной в непосредственной близости от камеры сгорания и от наиболее нагретых элементов газового тракта. Высоки также уровни давления и температуры воздуха, наддувающего уплотнения масляной полости данной опоры. Поэтому в системе суфлирования опоры турбины газогенератора, даже, при достижении высокой сепарирующей способности ее агрегатов, образовавшиеся пары масла не могут быть отделены от воздуха. Более того, эксперименты по конденсации таких паров (с помощью специального водяного теплообменника) и возвращению их в масляную систему показывают, что по мере наработки двигателя происходит постепенный рост вязкости масла (более чем на 30%). Очевидно, что из-за образования продуктов термической деструкции масла в принципе невозможно восстановить его исходные физико-химические свойства. Данный факт является ещё одним аргументом, свидетельствующим о необходимости разработки для теплонапряженной опоры турбины газогенератора конструктивных мероприятий по снижению уровня рабочей температуры масла в этой опоре. Поэтому, поскольку изменение конструкции авиапроизводного ГТД с переносом опоры турбины в менее нагреваемую зону проблематично, дальнейшие перспективы уменьшения эксплуатационного расхода масла связаны со снижением температуры воздуха, наддувающего уплотнения масляных полостей, при сохранении требуемого уровня его давления. Одним из таких технических решений является предварительное охлаждение указанного воздуха перед его поступлением в предмасляные полости опор для наддува уплотнений валов. Возможности стационарного оборудования и наличие хладагентов позволяют произвести требуемое охлаждение этого воздуха. Однако это повлечёт за собой необходимость изменения в самом двигателе схемы распределения внутренних потоков воздуха (осуществляющих охлаждение корпусов подшипниковых узлов, дисков турбины, разгрузку осевых сил, действующих на ротор турбокомпрессора, и др.).

В качестве перспективного мероприятия по снижению эксплуатационного расхода масла можно рассматривать применение в выходном канале системы суфлирования электрофилтра. В таком устройстве привлекательным является возможность осаждения частиц масла размером до 0,2 мкм с минимальными затратами энергии.

Следует отметить, что повышение эффективности функционирования системы суфлирования (приводящее к снижению стоимости жизненного цикла газотурбинного двигателя) можно осуществлять только при комплексном подходе к решению данной проблемы. Естественно, что величина эксплуатационного расхода масла определяется, главным образом, параметрами и конструкцией двигателя, но она может быть минимизирована лишь при рациональном выборе схемы и параметров системы суфлирования, а также при высоком совершенстве конструкции её агрегатов.

Заключение

В результате проделанной работы произведена систематизация существующей информации по системам суфлирования отечественных и зарубежных ГТД. Рассмотрены особенности наиболее типичных схем суфлирования масляных полостей ряда широко известных двигателей (RB-211, «Олимп»-593, CF6-50, CFM-56, НК-8-2У, НК-86, НК-93, Д-27).

Обоснованы преимущества использования в качестве сепарирующего устройства суфлёров радиального типа. Приведены материалы, содержащиеся в отраслевых стандартах авиадвигателестроения по выбору геометрических размеров рабочих колёс суфлёров. Показаны пути дальнейшего повышения эффективности суфлёров.

Проведён анализ особенностей использования в системах суфлирования газового эжектора.

Освещены вопросы взаимодействия системы суфлирования с масляной системой, в частности, показаны методы обеспечения «высотности» масляной системы за счёт определённых параметров системы суфлирования.

Сформулированы основные принципы выбора рациональной схемы системы суфлирования ТРДД. Разработаны предложения по оптимальному порядку проектирования системы суфлирования с использованием полуэмпирических методов.

Отражены специфические особенности проектирования систем суфлирования масляных полостей конвертированных авиапроизводных ГТД наземного применения в качестве приводов электрогенераторов или газоперекачивающих агрегатов.

Данное учебное пособие может быть использовано для самостоятельных лабораторных работ, при выполнении курсовых и дипломных проектов студентов по тематике «Авиационные двигатели и энергетические установки».

Список литературы

1. Вьюнов С.А., Гусев Ю.И., Карпов А.В. и др. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей / Под общ. ред. Хронина Д.В. - М.: Машиностроение, 1989.
2. Ситчихин О.А., Трянов А.Е., Кульков Ю.В. Исследование эффективности центробежного суфлёра ГТД радиального типа. Техн. отчёт №001.3466 / КМЗ. Куйбышев, 1975.
3. Суфлёры маслосистемы приводные, центробежные, с радиальным входом. Колёса. Отраслевой стандарт. ОСТ 1 03845-76.
4. Колёса приводных центробежных суфлёров с осевым входом. Отраслевой стандарт. ОСТ 1 03950-79
5. А.с. Рабочее колесо динамического суфлёра / С.П. Горлищев, С.В. Жуков., Г.Л. Розенштейн, А.Е. Трянов, Ю.В. Кульков. - №719656; Оpubл. 18.06.73.
6. А.с. Масляный суфлёр авиационного ГТД / Б.М. Митин., С.В. Жуков, А.Е. Трянов, Л.И. Франкштейн - № 1014321; Оpubл. 21.12.82.
7. Осипкин Г.В., Жулёв Н.Г., Гришанов О.А. Исследование эффективности экспериментального суфлёра опоры турбины с тангенциальным входом воздушно-масляной смеси. Техн. отчёт № 001.8530 / КМЗ.- Куйбышев, 1986.
8. А.с. Устройство для суфлирования полостей подшипников авиационного двигателя / А.Н. Глотова, Г.М. Горелов, Г.И. Орловцев, Н.И. Старцев, А.Е. Трянов, Ю.И. Фёдоров - №1197572 ; Оpubл. 14.01.69
9. Горелов Г.М., Жуков С.В., Старцев Н.И., Трянов А.Е. Суфлирование масляных полостей опор роторов ТРДД с использованием газового эжектора: Сб. ст. №1, (сер. Турбореактивные двигатели) /КМЗ.-Куйбышев, 1969.
10. Таганов Г.И., Межиров И.И. К теории критического режима газового эжектора. //Сб. работ по исследованию сверхзвуковых эжекторов / ЦАГИ.-М., 1961.
11. Васильев Ю.Н. Теория сверхзвукового газового эжектора с цилиндрической камерой смешения // Лопаточные машины и струйные аппараты: Сб. Вып.2.- М.: Машиностроение, 1967.
12. Системы масляные газотурбинных двигателей самолётов. Общие технические требования. ОСТ 1 00969-80.
13. Метод исследования избыточности системы суфлирования масляных полостей, методические указания. МУ 1.1.189-89.
14. Программа анализа гидравлических систем, (разработанная в Харьковском политехническом институте под руководством Слетенко А.Н.).
15. Пат. №1241785 РФ. F01M 1/12, F02C 7/06. Система смазки стационарного газотурбинного двигателя / В.Н. Орлов, М.Т. Василишин, С.В. Жуков, А.Е. Трянов, Г.В. Осипкин. Оpubл. 11.05.94г.
16. Петров П. Г. Теоретическое и экспериментальное исследование осевых центробежных суфлёров осевого типа: Дис. канд. техн. наук. - М., 1976.
17. Уоллис Г. Б. Одномерные двухфазные течения. -М.: Мир, 1972.
18. Хьюитт Дж., Холл-Тейлор М. Кольцевые двухфазные течения. -М. Энергия, 1974.

Приложение

**ОСТ 1 03950-79. КОЛЕСА ПРИВОДНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СУФЛЕРОВ
С ОСЕВЫМ ВХОДОМ**

Настоящий стандарт распространяется на вновь разрабатываемые колеса приводных центробежных суфлеров с осевым входом, предназначенные для сепарации воздухосмесьной смеси (аэрозоля) и устанавливаемые в системах суфлирования авиационных газотурбинных двигателей.

ТИПЫ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Стандарт устанавливает один тип колес: колеса с радиальными лопатками. Основные параметры колес должны соответствовать указанным в табл. 1.

Основные параметры колёс

Наименование параметра	Норма для типоразмера		
	1	2	3
Массовый расход воздуха, г/с	От 1 до 15 вкл.	Св. 15 до 50 вкл.	Св. 50 до 100 вкл.
Максимальное гидравлическое сопротивление, МПа (кгс/см ²)	0,002 (0,02)		
Диапазон рабочих частот вращения, об/мин	10000 – 14000		
Максимальный объемный расход неотсе- парированного масла, л/ч	0,02		

Размеры элементов колеса должны соответствовать указанным на рис.1 и в табл.2

Размеры элементов колёс Таблица 2.

Типоразмер	D	d	l	l_1	l_2	Кол. лопаток	b , не менее
1	55	20	50	18	13	6	6
2	65	30	55	23	18	8	7
3	75	40	60	28	23	12	

Тип входа в суфлер и размещение опор колеса не регламентируется.

Площадь проходных сечений в канале за колесом должна быть не менее площади сечения на выходе из колеса.

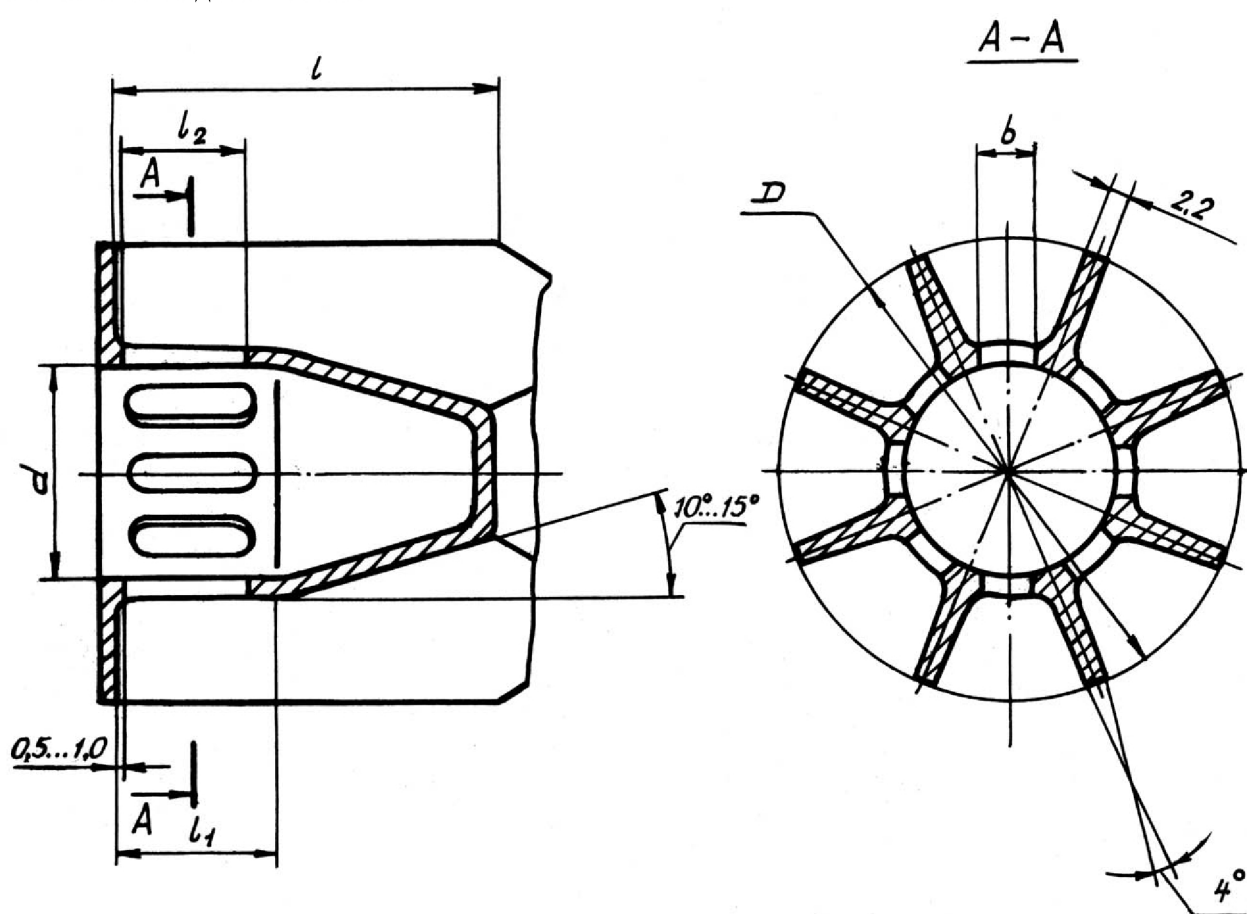
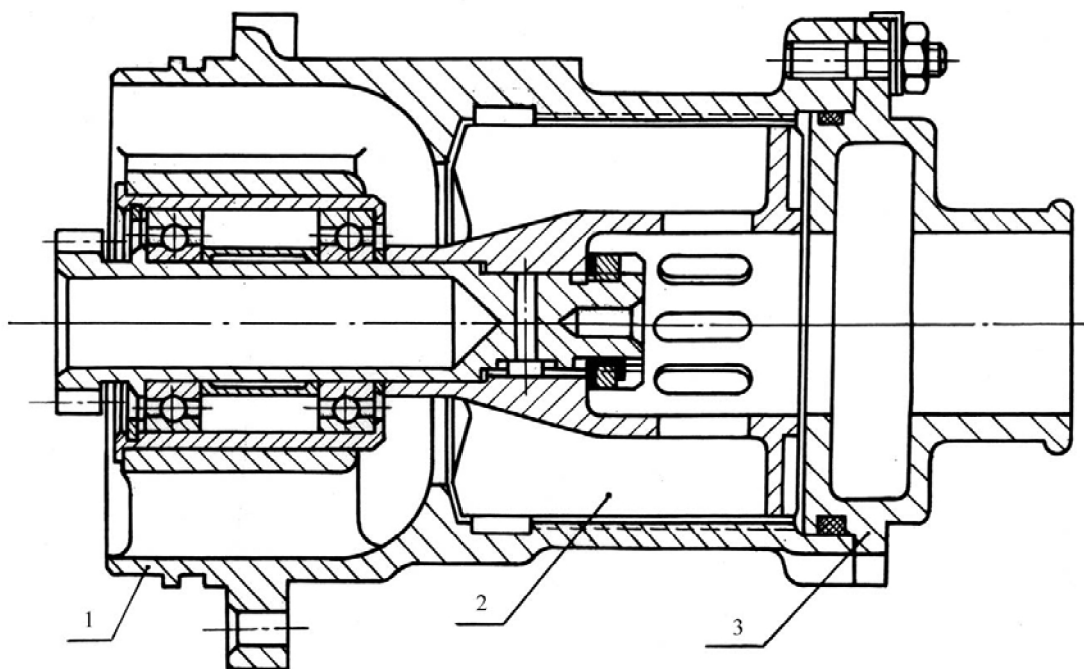


Рис. 1. Рабочее колесо осевого суфлёра

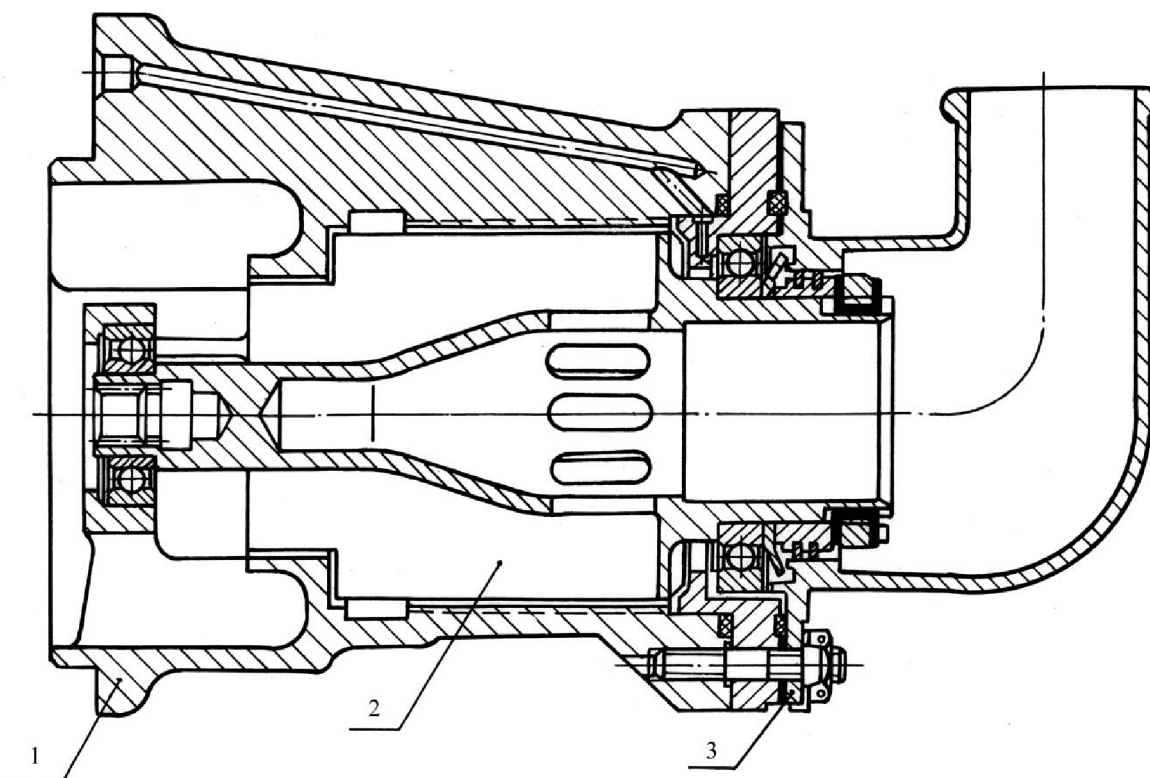
ПРИМЕРЫ УСТАНОВКИ КОЛЕСА В СУФЛЁР

Консольная установка колеса приведена на рис.2. Установка колеса на двух опорах приведена на рис. 3.



1 - корпус суфлера; 2 - колесо; 3 - крышка

Рис. 2. Консольная установка колеса



1 - корпус суфлера; 2 - колесо; 3 - крышка

Рис 3. Установка колеса на двух опорах

Учебное издание

*Трянов Анатолий Ефимович, Гришанов Олег Алексеевич,
Бутылкин Сергей Викторович*

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ СУФЛИРОВАНИЯ
МАСЛЯНЫХ ПОЛОСТЕЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Учебное пособие

Технический редактор *В. В. Бирюк*
Редакторская обработка *Н. В. Прядильникова*
Корректорская обработка *К. А. Айталиева*
Верстка *А. Е. Трянов*
Доверстка *О. Ю. Дьяченко*

Подписано в печать 24.11.06. Формат 60×84 1/8
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 9,77. Усл. кр.-отт. 9,89. Печ. л. 10,5
Тираж 50 экз. Заказ . ИП-43(4)/2006

Самарский государственный аэрокосмический университет.
443086, Самара, Московское шоссе, 34

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34