

## Режим пуска и переходный режим разгона и прогрева

### Пуск двигателя с последующим выводом на полную нагрузку

Пуск судовых двигателей осуществляется сжатым воздухом, двигатели малой мощности обычно пускаются электростартером.

Процесс пуска условно можно представить в виде следующих последовательных стадий:

□ Интенсивное раскручивание вала двигателя под действием подаваемого в цилиндры сжатого воздуха до минимальных оборотов, при которых создаваемые в цилиндрах давления и температуры сжимаемого воздуха будут достаточны для самовоспламенения и последующего сгорания впрыскиваемого топлива;

□ Впрыск топлива и его самовоспламенение в одном или более цилиндрах и продолжение раскручивание вала двигателя на продолжающемся поступать воздухе и сгорающем топливе (смешанный пуск);

□ Переход двигателя на работу на топливе и выход на заданный режим.

Движущий момент, создаваемый пусковым воздухом  $M_{дв}$ , необходим для преодоления:

- момента **инерции** масс движущихся частей двигателя, валопровода и гребного винта и присоединенной массы воды, увлекаемой вращающимся винтом  $M_{ин}$

- сил **трения**  $M_{тр}$  и сопротивления **винта**  $M_{в}$

$$M_{дв} = M_{ин} + M_{тр} + M_{в}$$

Кроме того, необходимо затратить работу на **сжатие** в цилиндрах воздуха для обеспечения последующего воспламенения топлива.

Пусковая система включает установленные на каждом цилиндре пусковые клапаны и воздухораспределительные золотники, приводимые от кулачкового вала. Задача золотников состоит в том, чтобы обеспечить открытие и закрытие пусковых клапаны в необходимые моменты времени. Пусковые клапаны открываются при **2-6°** п.к.в после прихода поршня в ВМТ, и закрываются через **90-110°**.

Судовые двигатели пускаются при давлении пускового воздуха 30-10 бар. С падением давления воздуха в баллонах скорость раскручивания снижается, это наглядно показано на графике рис. 9.5, полученным проф. В.С. Гавриловым на двигателе Зульцер RD-76

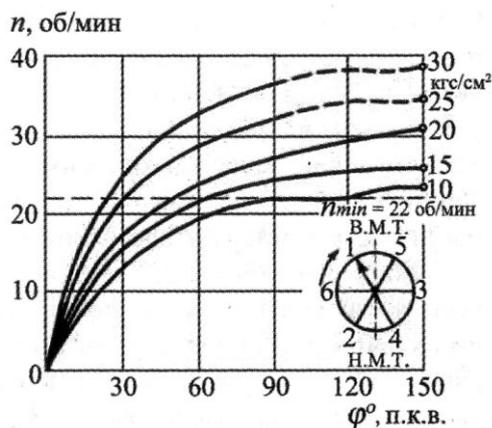


Рис. 9.5. Влияние давления пускового воздуха на скорость раскручивания вала

Пуск, как и маневрирование, сопряженное с остановками, реверсированием и сменой нагрузок, относится к неуставившимся и напряженным режимам, на которые приходится наибольшее число аварийных повреждений двигателей.

*Напряженность переходных режимов* определяется тем, что в процессе смены режима (нагрузки и частоты вращения) резко изменяется рабочий процесс, меняются условия нагрева и охлаждения цилиндров и

поршней. Напряжения в деталях ЦПГ и КШМ растут с увеличением скорости смены режима и становятся наибольшими при пуске холодного двигателя, резком выведении его на полную нагрузку и внезапной остановке с полного хода. В этих условиях элементы конструкции подвергаются деформации и интенсивному изнашиванию, меняются зазоры и натяги в сопряжениях. В деталях, испытывающих действие высоких температур, развиваются термоусталостные явления, приводящие к образованию трещин. При пуске холодного двигателя в цилиндрах создаются неблагоприятные условия для самовоспламенения топлива. Сгорание его сопровождается чрезмерно высоким давлением и большой скоростью его нарастания. Это приводит к увеличению механических напряжений в деталях ЦПГ и КШМ, возникают большие ударные нагрузки в подшипниках.

Высокое давление сгорания  $p_z$  возникает и при пуске прогретого двигателя, если он недостаточно раскручивается на воздухе, и для создания необходимых ускорений даются **большие подачи топлива**. Так, при автоматическом пуске двигателя Зульцер RD 76 по максимальной программе, предусматривающей вывод двигателя сразу же после пуска на режим полного хода, давление в цилиндре достигает 8 МПа, а скорость нарастания давления при сгорании до 2 МПа на град, п.к.в. Столь жесткие условия пуска и разгона двигателя до полной частоты вращения можно допускать лишь в исключительных (аварийных) ситуациях. **В нормальных условиях пуска топливная рейка должна быть установлена в положение малых подач ( $h_a < 0,5n_{a\text{ном}}$ ) и разгон двигателя следует осуществлять постепенно.** Темп увеличения цикловой подачи топлива выбирать таким, чтобы обеспечить достаточно низкую скорость роста температур деталей ЦПГ.

*Жесткая работа двигателя при пуске* (особенно среднеоборотных) возможна также при использовании тяжелых топлив, для которых характерны худшие распыливание, испарение и замедленное сгорание. Поэтому при низких температурах рекомендуется запускать такие двигатели на **дизельном топливе**.

Перед пуском двухтактных двигателей с системой наддува при постоянном давлении для обеспечения воздухоснабжения необходимо запустить электровоздуховку.

Надежное самовоспламенение топлива в цилиндре определяется температурой сжатого воздуха, которая зависит от температуры окружающей среды, теплового состояния двигателя, состояния поршневых колец и пусковой частоты вращения (средней скорости поршня). Поэтому чтобы обеспечить легкий пуск, *двигатель необходимо предварительно прогреть*, прокачивая через него горячую воду. При прогреве снижается износ цилиндров в пусковой период, уменьшается коррозирующее действие кислот, образующихся при сгорании топлива.

Уменьшение потерь теплоты в стенки цилиндра способствует росту температур и давлений в конце сжатия и сокращению периода индукции, в связи с чем значительно снижается давление в цилиндре при первой вспышке. Это снижает механическую напряженность деталей цилиндра и улучшает работу подшипников коленчатого вала.

При работе холодного двигателя смазка подшипников и других узлов трения недостаточна, поскольку масло не успевает прогреваться, и высокая вязкость затрудняет его движение. Большая вязкость масла обуславливает также увеличение сопротивления прокручиванию двигателя в пусковой период. В связи с этим *необходимо перед пуском двигателя подогреть смазочное масло* в циркуляционной цистерне или картере до температуры **40-45°C**.

### **Переходные режимы разгона и прогрева**

Детали ЦПГ (поршень, крышка и втулка) при переходных режимах испытывают высокие тепловые нагрузки, под влиянием которых в них возникают термические напряжения, деформации, а иногда (при значительных перегрузках и частых сменах режимов) термоусталостные разрушения.

При пуске и в следующий за ним период разгона и прогрева двигателя интенсивно повышается температура его деталей (в первую очередь деталей ЦПГ) и охлаждающей воды, снижается вязкость смазочного масла и изменяются зазоры между сопрягаемыми поверхностями. Неравномерность прогрева деталей обуславливает появление в них высоких температурных градиентов, зависящих от скорости

прогрева, которая определяется скоростью изменения температуры деталей по времени  $\delta_t/\delta_\tau$ . Наиболее интенсивный прогрев (максимум  $\delta_t/\delta_\tau$ ) происходит в зонах **теповоспринимающих поверхностей** камеры сгорания и в местах движения основного потока теплоты. В поршне в первую очередь прогревается головка, юбка же разогревается вяло, накапливая теплоту главным образом в процессе теплопроводности. Поэтому колебания температуры юбки, как и нижней части втулки, с изменением режима работы мало заметны. Независимо от размеров и мощности двигателя наиболее интенсивный рост температуры деталей отмечается в начальный период их прогрева, особенно в течение **40-60 с** после первой вспышки в цилиндре. В это время температурные градиенты (перепады температур по толщине или в радиальном направлении) и термические напряжения достигают максимума. Затем температурное поле выравнивается, что сопровождается снижением напряжений. Дальнейшее развитие температурных градиентов и напряжений определяется временем прогрева и характером изменения нагрузки - чем больше нагрузка, на которую выводится двигатель после пуска, тем интенсивнее он прогревается и тем больше рост температур.

При прогреве холодного двигателя после пуска меняются зазоры между деталями, и происходит их деформация, особенно цилиндрических втулок мощных дизелей. Внешне это проявляется в появлении воды в контрольных отверстиях, выводящих ее из зоны уплотнения втулки. Существенно изменяются зазоры между поршнем и втулкой. Их неравномерное и неодновременное прогревание приводит к тому, что поршень расширяется быстрее втулки и при ускоренном прогреве зазор между ними в начальный период может существенно сократиться. Уменьшение зазора, деформация зеркала цилиндра и недостаточное поступление масла на смазывание цилиндра вследствие высокой вязкости являются причинами интенсивного изнашивания трущихся поверхностей. По мере прогрева и расширения втулки и рубашки цилиндра зазор несколько увеличивается и стабилизируется.

*При прогревании вспомогательного двигателя следует избегать длительной работы на холостом ходу, так как этот режим из-за низкого теплового состояния, плохого распыливания и сгорания топлива характеризуется сильным нагарообразованием, способствующим интенсивному изнашиванию цилиндров.*

Разница между максимальными уровнями температуры деталей ЦПГ, как и темп ее увеличения, во многом зависят от начального теплового состояния двигателя. Предварительный прогрев перед пуском обязателен для всех двигателей и, в первую очередь, для мощных МОД,

которые из-за больших размеров и значительной тепловой инерции во время пуска-разгона испытывают высокие тепловые нагрузки.

После длительной стоянки судна в порту или на рейде двигатель нагружают ступенями, т. е. после пуска он в течение некоторого времени работает на холостом ходу или на малой нагрузке, которую затем постепенно доводят до полной. Продолжительность работы на отдельных ступенях нагрузки зависит от типа, размеров, мощности и степени форсировки двигателя. Мощным МОД, имеющим большие массы металла, требуется для прогрева больше времени, чем меньшим среднеоборотным. Для последних, согласно исследованиям фирмы SEMT, оптимальное время прогрева 30-40 мин, из которых 8 мин составляют прогрев на холостом ходу, 2 мин - с медленным повышением нагрузки до 30% и 20-30 мин - с повышением нагрузки до полной.

При наличии систем дистанционного автоматического управления в них обычно заложены программы прогрева:

экстренный вывод под нагрузку (60-90 с);

ускоренный вывод под 100%-ную нагрузку (12-20 мин); *нормальный вывод под нагрузку (1,5-2 ч).*

### Остановка двигателя

Наряду с режимом прогрева не менее опасен и переходный режим резкого снижения нагрузки или внезапной остановки двигателя. При резком сбросе нагрузки и, особенно, при остановке двигателя, до этого работавшего в режиме полного хода, в нем, как и при прогреве, появляются высокие тепловые напряжения вследствие неравномерного остывания деталей ЦПГ. Наибольшие напряжения наблюдаются в первый период остановки двигателя, так как именно для этого периода характерна наибольшая скорость падения температуры нагретых поверхностей.

*Для уменьшения напряжений, возникающих при остывании горячего двигателя, необходимо заблаговременно, до полной остановки двигателя, снизить развиваемую им мощность. Мощные МОД рекомендуется переводить на режим среднего, затем малого хода за 30-60 мин до начала маневров.*

### Литература

1. Возницкий И. В. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Том 1./ И.В.Возницкий, А.С.Пунда – М.:МОРКНИГА, 2010.- 260 с. Стр. 216-221.

2. Возницкий И. В. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Том 1./И.В.Возницкий, – М.:МОРКНИГА, 2007.- 282 с. Стр. 272-275.

3. Возницкий И. В. Судовые дизели и их эксплуатация / И.В.Возницкий, Е.Г.Михеев – М.:Транспорт, 1990. - 360 с. Стр.292-293.