

## **Смазывание цилиндров, поршней и поршневых колец**

**Смазывание цилиндров.** Поршни и кольца, скользящие по поверхности цилиндра, должны быть разделены масляной пленкой, обеспечивающей 1) минимальный износ колец, цилиндра и поршня, 2) эффективное уплотнение от прорыва газов, 3) охлаждение и 4) промывание трущихся поверхностей.

**Задача поршневых колец заключается в равномерном распределении подведенного в цилиндр масла** в соответствии с указанными требованиями, и прежде всего — по высоте втулки цилиндра. При этом, учитывая более высокие температуры и испарение масла с поверхности, а также более интенсивную электрохимическую коррозию в верхней части цилиндра, последняя должна получать масла больше. Если подача масла не регулируется и оно подводится в избытке (а это характерно для тронковых двигателей со смазыванием разбрызгиванием), то поршневые кольца должны обеспечивать поддержание слоя масла, достаточного для осуществления гидродинамического трения, а избыток масла сбрасывать в картер, одновременно препятствуя его попаданию в камеру сгорания. Существуют **три способа** смазывания цилиндров:

**1) смазывание смесью** — масло, в количестве 10—15 % примешанное к бензину, поступает в цилиндр, большая часть его сгорает, часть же оседает на стенках цилиндра и растаскивается по его поверхности

кольцами (в мотоциклетных, лодочных карбюраторных двигателях);

**2) смазывание разбрызгиванием** — масло, вытекающее из подшипников кривошипно-шатунного механизма, забрасывается на нижнюю часть втулки цилиндра и разносится по втулке вверх поршневыми кольцами при движении поршня вверх, избыток масла сбрасывается в картер маслоъемными кольцами при движении поршня вниз (в тронковых средне- и высокооборотных двигателях);

**3) принудительное смазывание от лубрикаторов** — масло поступает на поверхность цилиндров от специальных насосов — лубрикаторов через штуцера, ввернутые в отверстия во втулке и равномерно расположенные по ее окружности на расстоянии не менее 0,36—0,38 мм. По обе стороны от отверстий обычно выфрезерованы *маслораспределительные канавки*, направленные под углом вниз и предпочтительно соединяющиеся друг с другом, тем самым образуя кольцевую волнообразную канавку, с помощью которой масло распределяется по окружности цилиндра. Края канавок закруглены в целях образования масляного клина при движении мимо них поршневых колец. Вверх и вниз от отверстий масло разносится поршневыми кольцами (в крейцкопфных и некоторых среднеоборотных двигателях, в которых масло подается в цилиндры как лубрикаторами, так и разбрызгиванием).

**Лубрикатор** — многоплунжерный насос высокого давления — применяют для дозированной подачи масла в цилиндры двигателя под давлением

0,5—0,7 МПа. В корпусе лубризатора обычно размещается 10—12 плунжерных насосов, каждый из которых подает масло к одной точке для смазывания.

*Дозированную подачу масла* можно осуществлять с помощью золотников, регулирующих количество масла, поступающего к насосному элементу, или путем изменения полезного хода плунжера.

В корпусе 7 лубризатора двигателей **БМЗ—МАН—Бурмейстер и Вайн** (рис. 7.12) размещаются плунжерные пары. Привод плунжеров осуществляется от кулачков 9, сидящих на общем валике 8 который приводится во вращение от вала топливных насосов. Масло к плунжерам 6 поступает из корпуса через нижние шариковые клапаны 5 и нагнетают его через верхние клапаны 3 в прозрачную пластмассовую ротаметрическую трубку 2, имеющую канал, с небольшой конусностью, внутри которого находится металлический шарик. Во время нагнетательного хода плунжера давлением масла шарик поднимается. Высота подъема шарика характеризует подачу цилиндрического масла. При попадании воздуха в корпус одного из плунжерных насосов подача масла прекращается, и шарик опускается.

Подачу масла дозируют изменением хода плунжера насоса. Обычно ход плунжера составляет 2 мм, но

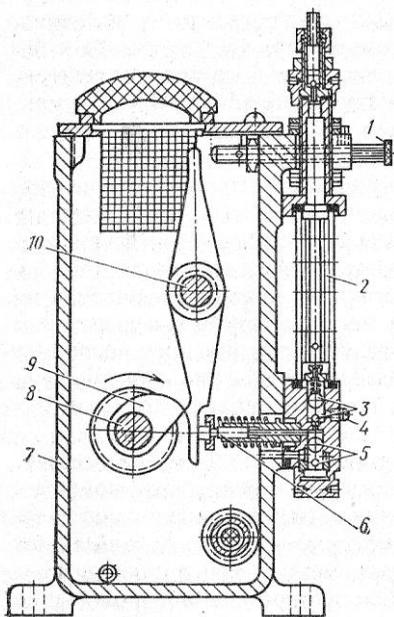


Рис. 7.12. Лубрикатор дизеля БМЗ — МАН — Бурмейстер и Вайн

152

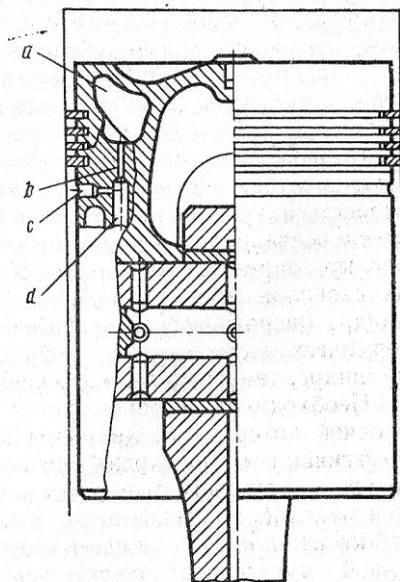


Рис. 7.13. Схема подвода масла к цилиндру через поршень

может быть увеличен до 6 мм. Для изменения подачи всех плунжеров поворачивают эксцентричную ось 10 рычагов, через которые кулачки воздействуют на плунжеры. Ход каждого плунжера можно регулировать винтом 1. Установкой эксцентричной оси в определенное положение и с помощью регулировочного винта ограничивают перемещение нижнего конца рычага вправо и тем самым ход плунжера, Масло заливают в лубрикатор через сетчатый фильтр до верхнего уровня смотрового стекла. Для удаления воздуха из насосных элементов

отвертывают винт 4, рукояткой вращают эксцентричную ось рычагов, приводят действие плунжеры. Прокачивание прекращают после появления сплошной струи масла из воздушных отверстий. Для удаления воздуха из системы отсоединяют трубки у точек смазывания и прокачивают систему.

В мощных тронковых двигателях **Вяртсиля Ваза-32 и 46** ЦПГ смазывают маслом, поступающим по шатуну на охлаждение поршня (рис. 7.13). Из полости *a* охлаждения по каналу *b* масло поступает в равномерно расположенные по окружности сопла, далее оно распределяется по проточенной в тронке поршня канавке *c* и заполняет зазор между поршнем и втулкой. Остальное масло по каналу *d* сливается в картер.

Подобный метод гарантирует надежное поступление масла и исключает появление микрозадиров и большие износы, вероятность которых в высоконапряженных двигателях достаточно велика. Обильный подвод масла требует применения колец с большим маслосбрасывающим действием в целях уменьшения его заброса в камеру сгорания и потерь на угар.

*Смазывание разбрызгиванием* является наиболее простым решением, но по сравнению с принудительным способом оно обладает двумя, существенными недостатками:

1) подача масла на втулку цилиндра нерегулируема и, как правило, **избыточна**;

2) на втулку попадает **несвежее масло**, проработавшее в циркуляционной системе смазки, частично окислившееся и потерявшее в известной мере нейтрализующее и другие необходимые, свойства.

**В противоположность отмеченному, принудительное смазывание позволяет строго дозировать подачу масла в цилиндры и подавать свежее масло, наиболее удовлетворяющее по своим характеристикам требованиям смазки цилиндров и нейтрализации в них кислых соединений.**

Подаваемое в цилиндры масло расходуется на

- смазывание рабочих поверхностей цилиндров, поршневых колец, поршней,
- забрасывается в камеру сгорания и продувочно-выпускные окна (в двухтактных двигателях) либо
- сбрасывается в картер или в подпоршневые полости.

Масло, распределяемое тонкой пленкой по поверхности цилиндра, выполняя функцию разделения трущихся поверхностей, одновременно нагревается, подвергается воздействию горячих, агрессивных продуктов сгорания и воздуха, большим тепловым потокам со стороны поршня. В масле в результате окислительных процессов образуются органические кислоты, оно насыщается сильными неорганическими кислотами, сажей. Большая часть масла, особенно находящаяся на верхней поверхности цилиндра, испаряется. Пары масла диффундируют в воздух и сгорают либо уносятся с выпускными газами в выпускной тракт. Остальная часть масла, ставшая

более вязкой и вобравшая в себя продукты сгорания, частично сбрасывается поршневыми кольцами в картер либо в подпоршневые полости, частично остается на стенках цилиндра и поршней, преобразовываясь в лаки и нагары.

На *толщину масляной пленки* на поверхности цилиндра оказывают влияние:

- 1) количество подаваемого масла и способ подвода;
- 2) скорость движения колец вдоль поверхности цилиндра, зависящая от скорости поршня двигателя;
- 3) радиальное давление колец на втулку, определяемое нагрузкой цилиндра, упругостью колец и их расположением на поршне;
- 4) качество рабочей поверхности цилиндра (шероховатость);
- 5) свойства масла (вязкость, маслянистость, термическая стабильность и пр.);
- 6) температура и давление газов в цилиндре, температура смазываемых поверхностей втулки, поршня.

Необходимое возобновление или освежение масляной пленки на рабочей поверхности цилиндра в двигателе с подачей масла разбрызгиванием происходит при каждом ходе поршня вверх. В двигателе с принудительным смазыванием нарушение поступления масла из штуцеров в известной мере нарушает цикличность возобновления пленки на поверхности цилиндра. Для сохранения масляной пленки необходимо, чтобы количество возмещаемого масла  $G_M$  покрывало его расход  $G_{MP}$ , обусловленный испарением и сгоранием масла  $G_{исп}$ , его

забрасыванием кольцами в камеру сгорания  $G_{КС}$  (частично это масло сгорает, переходит в нагары, уносится с выпускными газами), сбросом частично окислившегося масла в выпускные окна, где оно откладывается в виде нагара, и в подпоршневую полость или в картер  $G_K$ :

$$G_{MP} = G_{ИСП} + G_{КС} + G_K$$

Если подача масла в цилиндр недостаточна ( $G_M < G_{MP}$ ), то поддержание масляной пленки необходимой толщины становится невозможным, режим трения из жидкостного может перейти в граничный или в пределе - к сухому трению.

**Роль поршневых колец в формировании масляной пленки.** Поршневое кольцо в радиальном направлении испытывает действие силы газов  $P_g$  (рис. 7.14), проникших в заколочное пространство и прижимающих кольцо к поверхности втулки цилиндра. В этом же направлении действует и сила упругости  $P_{упр}$  металла самого кольца. Сумма сил  $P_g + P_{упр} = P_{рад}$  представляет собой радиальную силу, которая благодаря падению давления газов вдоль образующей, поршня, (сказывается лабиринтное действие колец) максимальна у первого кольца и минимальна у последнего. Первое кольцо ввиду большого, радиального давления на ходе сжатия срезает часть масла с поверхности втулки и гонит его перед собой, создавая, валик, заполняющий зазор между боковой поверхностью головки поршня и втулкой цилиндра. Это масло можно считать потерянным, так как оно либо забрасывается в камеру сгорания, либо полимеризуется и сгорает в зазоре, образуя при

больших подачах масла в цилиндр на головке поршня твердые отложения золы присадок.

При трении твердых отложений о рабочую поверхность цилиндра на ней образуются полосы натира и даже износа, располагающиеся в плоскостях нахождения масляных штуцеров. Захват масла кольцами и поршнем способствует насосу действие колец» усиливающее перекачивание масла в камеру сгорания. Перекачивание масла или проход его через кольцевое уплотнение вверх происходит в те короткие промежутки времени, когда кольцо под действием силы инерции своей массы меняет опорную торцовую поверхность (см. рис. 3.5, ж). Это происходит во время насосных ходов четырехтактного двигателя, когда кольца разгружены от силы действия газов. В двухтактном двигателе кольца практически все время прижаты своей нижней торцовой поверхностью к

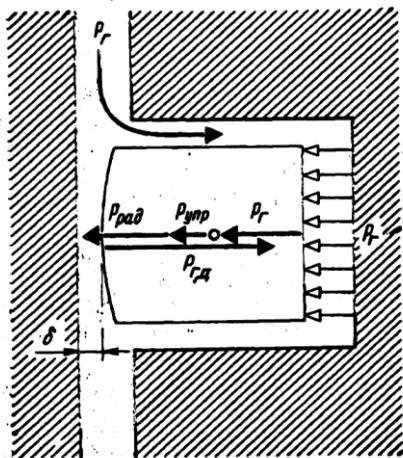


Рис. 7.14. Силы, действующие на поршневое кольцо

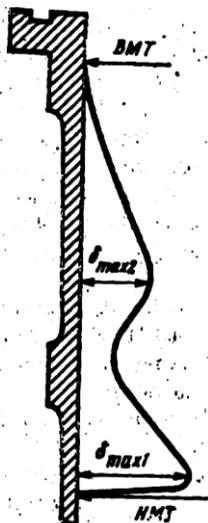


Рис. 7.15. Изменение толщины пленки масла по высоте цилиндра

поверхности кепа поршня, поэтому влияние перекачивания масла в них отсутствует.

Интенсивное перекачивание масла и связанное с этим увеличение расхода на угар наступает ввиду плохого прилегания колец к опорным поверхностям при сильно изношенных или плохо обработанных поршневых канавках. Рабочая поверхность поршневого кольца в процессе истирания приобретает слегка бочкообразную форму что обуславливает появление при движении в слое масла под ним клина и сопутствующего ему расклинивающего эффекта. Возникающая гидродинамическая сила  $P_{ГД}$  будучи направленной против радиальной силы  $P_{рад}$  отжимает кольцо от поверхности цилиндра, кольцо всплывает, оставляя под собой слой масла  $\delta$ .

Силы  $P_{рад}$  и  $P_{ГД}$  в свою очередь зависят от силы действия газов, в цилиндре, связанной с положением поршня и скоростью его движения. С увеличением скорости поршня, равно как и вязкости масла, гидродинамическая сила растет, сила действия газов в свою очередь снижается, и равенство сил достигается при большей толщине слоя масла. Этим, а также суммарным действием ранее перечисленных факторов объясняется неодинаковая толщина пленки масла по высоте цилиндра (рис. 7.15). Вблизи ВМТ, где скорость поршня близка к нулю, толщина слоя минимальна, и условия трения близки к граничному. Зона граничного трения от ВМТ распространяется вниз на значительный участок втулки, так как здесь, помимо малой скорости поршня, отрицательное влияние на пленку оказывают также высокие температуры,

снижающие вязкость масла и способствующие его интенсивному испарению. Вблизи НМТ благодаря интенсивному забросу масла из картера толщина пленки достигает максимального значения. Однако по мере продвижения вверх она быстро уменьшается, что определяется маслосбрасывающим действием колец. Второго максимума толщина  $\delta$  достигает в зоне, расположенной от середины хода поршня вниз; именно здесь поршень развивает максимальную скорость, сила гидродинамического давления на поршневые кольца со стороны масла увеличивается, а температура и интенсивность испарения масла с поверхности не столь велики.

На большей части хода поршня толщина пленки составляет более 20 мкм, поэтому *режим смазывания здесь носит гидродинамический характер*. Приведенный пример относится к высокооборотному двигателю, в двигателе малооборотном в связи с меньшей скоростью поршня и подачей масла на смазывание цилиндров толщина слоя масла меньше, однако и в них режим смазывания в основном носит гидродинамический характер. Исключение составляют зоны ВМТ и НМТ, более протяженные, чем в высокооборотных двигателях, где *режим смазывания подчиняется законам граничного трения*.

Эффективное смазывание существенно затрудняется или нарушается там, где имеется пропуск газов вдоль образующей цилиндра — независимо от того, вызван он нарушением цилиндричности вследствие деформации или износа, или нарушениями в работе колец (потеря упругости, зависание в кепках,

поломка). В местах прорыва газов масляная пленка перегревается, окисляется, сгорает или сдувается; если в таких случаях локальные участки поверхности металла остаются незащищенными, это способствует как коррозионному, так и механическому изнашиванию. Особенно велика опасность прорыва газов через первое поршневое кольцо. Прорыв газов происходит всегда через открытые замки поршневых колец, особенно опасна ситуация, когда замки колец выстраиваются в одну линию. Поэтому важно сохранение подвижности колец в кепках, когда кольца имеют возможность непрерывно вращаться, занимая положения, не зависящие друг от друга.

Пропуск газов через кольца вследствие их неплотного прилегания определяют по появлению на кольцах местных пятен (ожога), а на втулке -темных полос. Особенно тяжелые условия смазывания отмечаются в двухтактном двигателе в поясе выпускных окон, где существуют благоприятные условия для сдувания масла с поверхностей втулки, колец и поршня в момент прохождения его мимо окон и их открытия. Этим объясняются повышенные износы втулок в поясе окон и задиры, типичные для двигателей с петлевой схемой газообмена.

**Определение количества и регулирование подачи масла лубрикаторм.** Масло, поданное в цилиндр лубрикаторм, должно разделить трущиеся поверхности ЦПГ путем создания на них слоя, состоящего из адсорбированных полярных молекул (граничная смазка) или более толстого слоя масла (жидкостная смазка). В этих случаях внешнее трение

сопряженных поверхностей заменяется на внутреннее трение между слоями масла, при котором резко уменьшаются работа трения и износ. Но количество поступающего масла должно быть достаточным для нейтрализации щелочными соединениями масла коррозионно-активных кислот, конденсирующихся на стенках цилиндра при работе двигателя на сернистых топливах. Поэтому расход масла, имеющего высокую щелочность, может быть установлен ниже расхода слабощелочного масла.

Подача масла при заданной его щелочности считается достаточной, если при использовании топлива с содержанием серы более 2 % щелочность отработавшего масла, стекающего со стенок цилиндра в подпоршневую полость, превышает 10 мг КОН/г.

Дозировку масла осуществляют общим регулированием подачи лубриката. Если по условиям плавания предполагается длительная работа двигателя на режимах малых нагрузок, то во избежание чрезмерного расхода масла, загрязнения цилиндра продуктами полимерзации и замасливания выпускного тракта следует уменьшить подачу лубриката.

При использовании в двигателе тяжелого топлива с высоким содержанием серы рекомендуется перед началом маневров увеличить подачу масла и вернуть ее на прежний уровень лишь после вывода двигателя на режим постоянной нагрузки. Это предотвратит коррозию зеркала цилиндров и поршневых колец во время остановки двигателя, когда

из-за естественной тяги из проникающего в холодные цилиндры воздуха на их стенках выпадает конденсат.

Толщина формируемого кольцами слоя масла по высоте втулки меняется от нескольких микрон в зонах ВМТ до 20 мкм и более в средней ее части. Первые порции масла, поступающего в цилиндры перед пуском двигателя при ручной прокачке лубрикаторов, расходуются на создание этого слоя.

Несложный расчет показывает, что единичная подача масла на цилиндр через все точки смазывания (8 штуцеров в двигателях Зульцер RD) на протяжении 12 оборотов при удельном расходе масла  $g_m = 0,8$  г/(кВт.ч), будучи равномерно распределенной по поверхностям цилиндра и поршня, обеспечивает толщину слоя масла всего 0,269 мкм. Этого явно недостаточно, и желательно, чтобы при проворачивании лубрикаторов была осуществлена по крайней мере десятикратная подача. После того как пленка в цилиндрах будет сформирована, подача масла должна продолжаться, так как при работе двигателя оно необходимо для восполнения потерь, связанных с его испарением с поверхностей цилиндра, сгоранием и сбросом в подпоршневые полости и в окна. Оставшееся на стенках цилиндра масло частично теряет свои свойства вследствие окисления и расходования присадки, поэтому добавка свежего масла необходима не только для замещения потерь, но и для обновления его состава — освежения.

Количество подаваемого масла должно соответствовать рекомендациям фирм-двигателестроителей и опыту эксплуатации кон-

кретного двигателя. Важны также организация газообмена, расположение маслоподводящих отверстий, температуры поршня, втулки, поршневых колец. Так, в двигателях с контурными схемами газообмена (Зульцер, МАН) существует большая вероятность сдувания масла в выпускные окна и его заброса в камеру сгорания (последнее определяется верхним расположением маслоподводящих отверстий). В результате эти двигатели по сравнению с двигателями с прямоточной схемой газообмена имеют более высокий удельный расход масла. Повышенные подачи масла требуются также в двигателях с большей форсировкой рабочего процесса в связи с ростом потерь масла на испарение, окислительную полимеризацию и нагарообразование. Ведущие фирмы дают рекомендации по количеству масла на смазывание цилиндров. Нормирование подачи масла принято на основе удельного расхода  $g_m = G_M/N_e$ , отнесенного к номинальной мощности при номинальной частоте вращения.

*Фирма «Зульцер»*

Двигатели типа RD:  $g_m = 0,54 - 0,81$  г/(кВт·ч) [0,4 - 0,6 г/(элс·ч)]; двигатели типа RND-M:  $g_m = 0,95 - 1,36$  г/(кВт·ч) [0,7-1,0 г/(элс·ч)].

*Фирма MAN*

Двигатели типа KZ70/120E:  $g_m = 1,09-1,5$  г/(кВт·ч) [0,8-1,1 г/(элс·ч)].

*Фирма «MAN—Бурмейстер и Вайн — БМЗ»*

Двигатели первой, второй и третьей степеней форсировки:  $g_m = 0,41- 0,54$  г/(кВт·ч) [0,3-г 0,4 г/(элс·ч)];

двигатели четвертой и седьмой (LGFCA) степеней, форсировки:  $g_m = 0,54 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$  [0,4 г/(элс·ч)]

двигатели десятой степени форсировки (L-МС):  $g_m = 0,81 \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)}$  [0,6 г/(элс·ч)].

Применительно к каждому типу двигателя задается диапазон значений расхода масла в зависимости от его качества (щелочности) и, что особенно важно, технического состояния двигателя. Правильность выбранного расхода масла проверяется практикой эксплуатации по следующим признакам.

*При завышенной подаче* масла отмечаются: значительное количество углеродистых отложений и золы присадок на боковой поверхности головки поршня, расположенной над верхним кольцом; повышенные отложения нагара по периметру выпускных окон и в выпускном тракте; обильное количество масла на тронке поршня и зеркале цилиндра; повышенный сброс масла в подпоршневую полость; щелочность проб масла, отбираемых из подпоршневых полостей цилиндров, превышает 25 % исходной щелочности свежего масла.

*При заниженной подаче* масла отмечаются: появление участков сухой поверхности на тронке поршня и зеркале цилиндра; ухудшение подвижности, защемление в слое нагара в кепках и пригорание поршневых колец; прорыв газов и искр в подпоршневую полость, возгорание масляных отложений в подпоршневых полостях; появление местных прижогов на втулках цилиндров, а также следов прорыва газов.

**Электронное управление лубрикатором.**

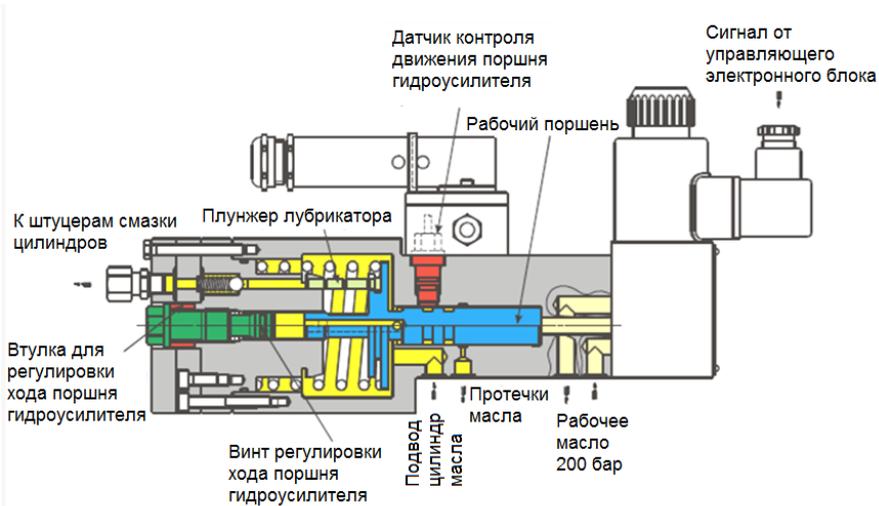


Рис. 14.13 Лубрикатор с электронным управлением (Альфа лубрикатор)

Использование в системе управления двигателем микропроцессоров позволило решить давно назревшую проблему организации смазки цилиндров. В традиционной системе, где используется механический привод лубрикаторов, ряд фирм для уменьшения подачи масла на смазку цилиндров при снижении нагрузочного режима связывали механизм подачи с положением рейки топливных насосов. Но, к сожалению, не могли достигнуть синхронизации подачи с движением поршня рабочего цилиндра, а это приводило к тому, что часть поступающего из штуцеров масла попадала в цилиндр над поршнем, и при его движении вверх поршневыми кольцами перемещалось в направлении камеры сгорания, где выгорало. Часть масла выходила из штуцеров цилиндра под поршень и при его движении вниз кольцами забрасывалось в продувочные и выхлопные окна. Идеальной считается подача в момент, когда

масло выходит из штуцера в промежуток между первым и вторым поршневыми кольцами. Тогда масло хорошо разносится по поверхности цилиндра и ранее отмеченные потери исключаются. В современной системе эта задача успешно решается и экономия в расходе цилиндрического масла в двигателях МЕ составляет свыше 0,3 г\кВт·час. Концепция новой системы смазки цилиндров с электронным управлением представлена на Рис. 14.12. Масло из цистерны цилиндрического масла поступает в насосную станцию, где его давление поднимается до 4,5 МПа и направляется в индивидуальные для каждого цилиндра аккумуляторы и далее в лубрикаторы. В станции находятся два рабочих насоса и один, автоматически включаемый в режиме stand-by. Количество лубрикаторов (1 или 2) на каждом цилиндре зависит от размеров цилиндра (количества штуцеров).

Лубрикатор (см. Рис. 14.13) снабжен поршнем гидроусилителя, подача масла на который осуществляется через быстродействующий двухпозиционный клапан, управляемый микропроцессором. Поршень приводит в движение размещенные по окружности плунжеры насосов высокого давления, обеспечивающие подачу одинаковых количеств масла по всем точкам смазки и, практически, в один момент времени. Количество плунжеров соответствует числу точек смазки. Лубрикатор подает масло через каждые в 4 -5 или более оборотов коленчатого вала в зависимости от требуемой величины подачи, выраженной в г\ кВт.час.

Увеличение подачи достигается увеличением частоты подач, уменьшение - наоборот. Время впрыска (момент подачи) задается микропроцессором с большой точностью с тем, чтобы поступление масла в цилиндр происходило в период, когда поршень своим комплектом колец находится в плоскости штуцера. Продолжительность подачи укладывается в 0,1 град, п.к.в. Величина, создаваемого плунжерами давления в нормальных условиях составляет 4,5 МПа, при закоксовывании отверстий может существенно увеличиваться, что обеспечивает гарантированную подачу.

#### Литература

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

Стр.199-201

#### Литература

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

Стр. 218-221

Возницкий И. В. Судовые дизели и их эксплуатация / И.В.Возницкий, Е.Г.Михеев – М.:Транспорт, 1990. - 360 с Стр. 150-158

Alpha Adaptive Cylinder Oil Control (Alpha ACC) MAN Diesel A/S  
MAN Diesel | PrimeServ Teglhømsgade 41 2450 Copenhagen SV  
Denmark