

ВВЕДЕНИЕ

Динамика поршневых двигателей является одним из важнейших разделов двигателестроения. Начало этой отрасли знаний как отдельной науки положено еще в трудах Ж.-В. Понселе, изложившего еще в 1829 г. ряд основополагающих понятий (в частности, работы) и впоследствии предложившего метод расчета маховиков применительно к двигателям существовавших тогда паровых машин-локомотивов.

Предметом динамики двигателей является исследование кинематики преобразующих механизмов¹ поршневых двигателей (определение законов движения, скоростей, ускорений звеньев механизмов и их отдельных точек); идентификация параметров расчетных моделей механизмов (позволяющая свести задачу о движении тел с распределенной массой к решению задачи о движении эквивалентной системы конечного числа замещающих точечных масс); силовой анализ (определение усилий в кинематических парах, крутящих моментов); уравновешивание. Эти вопросы решаются применительно не только к двигателестроению, но и к другим отраслям техники. При создании и исследовании поршневых двигателей решаются и некоторые специфические задачи, в частности определение степени неравномерности крутящего момента и вращения вала, расчет крутильных колебаний, анализ виброакустической активности и разработка способов ее снижения². Эти задачи решаются в линейной и нелинейной постановке, механизмы рассматриваются как дискретные и континуальные системы и пр.

В прежние годы были изданы учебные пособия по динамике поршневых двигателей (см., например, [1–3]). Их содержание в большей степени остается актуальным и в наши дни. Однако рост уровней форсирования двигателей совместно с некоторыми совре-

¹ В двигателях такие механизмы преобразуют движение поршней во вращение выходного (чаще всего коленчатого) вала.

² Это объясняется введением на всех видах транспорта нормативов, ограничивающих предельно допустимые нормы шума. Так, для автомобилей различных типов введены нормы R51 Европейской экономической комиссии ООН (ЕЭК ООН); для летательных аппаратов с винтомоторными энергетическими установками – Правилами ИКАО; для судовых дизелей – Правилами классификации и постройки морских судов и пр.

менными тенденциями в их проектировании (в частности, одна из таких тенденций в автомобилестроении известна как downsizing – уменьшение размеров и числа цилиндров двигателей), появление новых преобразующих механизмов (в частности, с переменными степенью сжатия и рабочим объемом и т. п.), развитие численных методов анализа механических и мехатронных систем (и реализующего эти методы программного обеспечения), появление новых практических задач и прочее побудили авторов к написанию этой книги, которая (надеюсь) будет благосклонно принята читателями.

В развитие динамики поршневых двигателей большой вклад внесли отечественные ученые – профессора И. Ш. Нейман, П. А. Истомин, Е. А. Григорьев, Ф. Ф. Симаков, В. Е. Тольский, Р. П. Доброгаев и др.

Книга предназначена для студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям «Энергетическое машиностроение» и родственным направлениям и специальностям, а также инженерно-технических работников двигателестроения. Структура книги отчасти соответствует принятой в [4]. В соответствии с изложенным выше в ней не рассматриваются графоаналитические методы (хотя их применение в отдельных случаях может быть оправданным), значительное внимание уделено практическому использованию численных методов расчета и реализующих последние профессиональных программных продуктов, исправлены замеченные опечатки и пр.

Авторы выражают благодарность рецензентам за внимательное прочтение рукописи и сделанные рекомендации, которые способствовали ее улучшению. Авторы будут также весьма признательны всем читателям за замечания и предложения по улучшению ее содержания.

ГЛАВА 1. ПРЕОБРАЗУЮЩИЕ МЕХАНИЗМЫ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В отличие от других типов расширительных машин, для поршневых двигателей предложено значительное число преобразующих механизмов. Некоторые из них были внедрены в массовое производство для всех энергетических установок всех назначений (примером может служить кривошипно-шатунный механизм – КШМ); некоторые были всесторонне изучены, но по ряду причин не внедрены в производство (либо существовали только в виде опытных образцов, например бесшатунный механизм С. С. Баландина [5], пространственные механизмы аксиально-поршневых двигателей [6], механизм Нордберг [7] и др.); большое количество предложенных механизмов известны только в виде патентных решений.

Основным типом преобразующих механизмов для поршневых двигателей всех назначений, размерностей, уровней форсирования и прочего в настоящее время является КШМ (рис. 1.1).

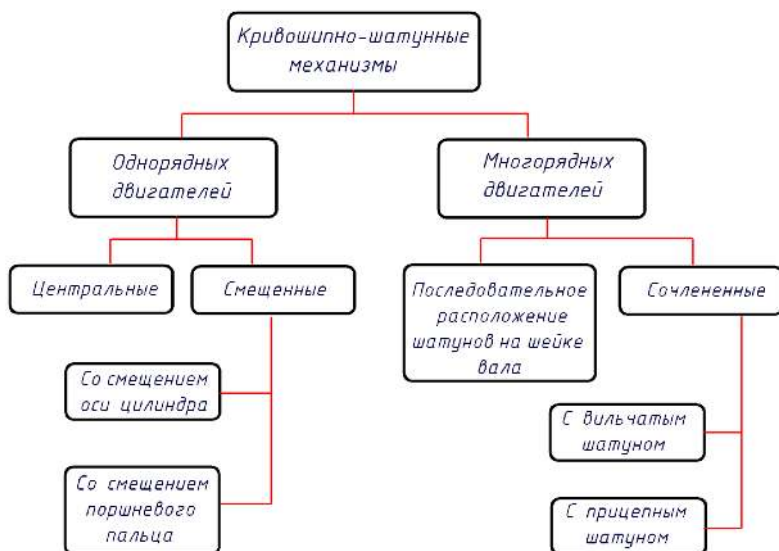


Рис. 1.1. Классификация КШМ по конструктивным признакам

В однорядных (рядных) двигателях цилиндры располагаются вдоль оси вращения коленчатого вала, число кривошипов которого равно числу цилиндров. При этом с каждым кривошипом сочленяется шатун. Это наиболее распространенная компоновочная схема для двигателей легковых и небольших грузовых автомобилей, ряда современных авиационных двигателей, стационарных установок, а также единственно возможная для малооборотных судовых дизелей даже при значительном числе цилиндров.



Рис. 1.2. 14-цилиндровый рядный малооборотный судовый дизель Wärtsilä-Sulzer RTA96 (отношение хода поршня S к диаметру цилиндра D $S/D = 2500/960$ мм, мощность $N_c > 80\,000$ кВт, частота вращения $n = 102$ мин⁻¹, рабочий объем $V_h = 25\,480$ л, масса 2300 т)³

В многорядных двигателях с каждым кривошипом коленчатого вала сочленяется несколько шатунов (по меньшей мере два), в связи с чем число кривошипов вала меньше числа цилиндров двигателя. Наиболее распространена здесь V-образная компоновка, в которой цилиндры располагаются вдоль оси вращения вала в два ряда, расположенных под углом друг к другу. Эта схема применялась ранее и

³ Фото с сайта 1gai.ru.

применяется сейчас в двигателях практически всех назначений, уровня форсирования, размеров и пр. (за исключением малооборотных судовых) (рис. 1.3).



Рис. 1.3. 12-цилиндровый V-образный авиационный дизель RED A03
($S/D = 88/85$ мм, $N_e = 370$ кВт, $n = 4000$ мин⁻¹)⁴

Столь же широко распространены звездообразные двигатели, у которых шатуны всех цилиндров могут быть связаны с одним кривошипом вала. Звездообразные компоновочные схемы позволяют создавать двигатели с наибольшим числом цилиндров (рис. 1.4).

Более обширные сведения о компоновочных схемах поршневых двигателей приведены в источниках [8, 9].

Перейдем к рассмотрению кинематических схем КШМ, указанных на рисунке 1.1. Наиболее простым является центральный КШМ, кинематическая схема которого показана на рисунке 1.5. В связи с конструктивной и технологической простотой этот тип КШМ применяется наиболее широко.

⁴ Фото с сайта <http://ru-aviation.livejournal.com>.

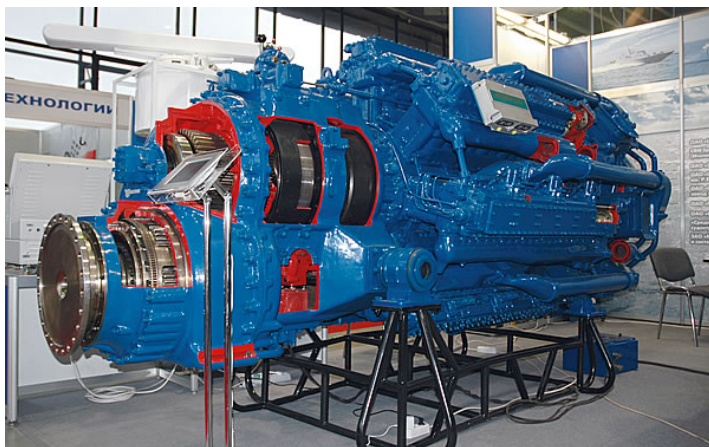


Рис. 1.4. 56-цилиндровый звездообразный высокооборотный судовой дизель М-503А ($S/D = 170/160$ мм, $N_e = 370$ кВт, $n = 4000$ мин⁻¹)⁵

В центральном КШМ ось цилиндра OB пересекает ось поршневого пальца B и ось вращения коленчатого вала O (две последние оси перпендикулярны плоскости рисунка). Конструктивными параметрами такого механизма являются радиус кривошипа R и длина шатуна L . Текущей независимой переменной для исследования механизма является угол поворота кривошипа α , отсчитываемый от оси цилиндра в сторону вращения коленчатого вала. Примем, что вал вращается по часовой стрелке (при наблюдении со стороны носка вала в сторону хвостовика) с постоянной угловой скоростью $\omega = \pi n/30$, с⁻¹. Важным безразмерным параметром КШМ является величина $\lambda = R/L$, которую называют постоянной КШМ или относительной длиной шатуна. Для двигателей всех типов и назначения эта величина может изменяться пределах 0,06–0,4; для двигателей одного типа и назначения этот диапазон сужается. Так, для большинства двигателей назем-

⁵ Фото из статьи: Казеннов, В. Флоту нужны российские дизели. Они ничем не уступают зарубежным [Электронный ресурс]. – URL: <http://nationaldefense.ru/includes/periodics/defense/2011/1114/19347654/detail.html> (дата обращения 15.10.2016).

ных транспортных средств $\lambda = 0,2-0,3$; для малооборотных судовых дизелей $\lambda = 0,06-0,15$ и т. д.

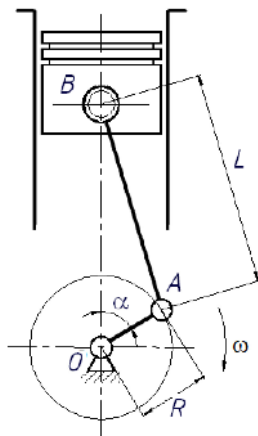


Рис. 1.5. Кинематическая схема центрального КШМ

При смещении оси цилиндра относительно оси вращения вала или оси поршневого пальца КШМ становится смещенным. Само смещение называют также дезаксиалом (дезаксажем), а смещенный КШМ – дезаксиальным КШМ. При смещении оси цилиндра (рис. 1.6) в направлении вращения вала уменьшается боковая сила $N = P_{\Sigma} \times \text{tg} \beta$, действующая со стороны поршня на стенку цилиндра в процессе расширения рабочего тела (при этом поршень движется в сторону нижней мертвой точки). Уменьшение силы N происходит за счет уменьшения угла поворота шатуна β . При этом уменьшается трение (и соответственно износ поршня и цилиндра). Такой эффект ранее достигался в малофорсированных бензиновых двигателях с невысокими значениями степени сжатия и давления газов в цилиндре в конце процесса сжатия. В современных высокофорсированных дизелях, когда давление в конце сжатия достигает 8–10 МПа, боковая сила (и соответственно трение и износы поршня и цилиндра) возрастает (по сравнению с центральным КШМ) в процессе сжатия рабочего тела (когда поршень движется в сторону верхней мертвой точки). Таким образом, суммарный положительный эффект в КШМ со смеще-

нием оси цилиндра не достигается. В связи с этим такой КШМ в современном двигателестроении не применяется.

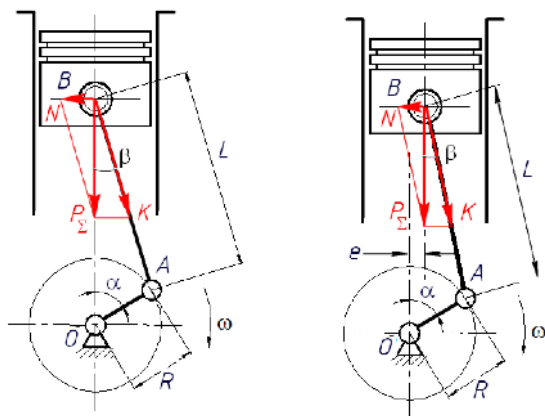


Рис. 1.6. КШМ со смещением оси цилиндра:

P_{Σ} – суммарная движущая сила;

K – продольная сила, действующая на шатун.

Конструктивными параметрами КШМ со смещением оси цилиндра являются указанные выше радиус кривошипа R , длина шатуна L , а также абсолютная величина смещения оси цилиндра e (смещение в сторону вращения коленчатого вала считается положительным). Наряду с постоянной КШМ вводится еще одна безразмерная относительная величина k – относительное смещение (относительный дезаксис), определяемое по выражению $k = e / R$. Для двигателей, имевших смещение оси цилиндра, величина k составляла 0,005–0,2.

В отличие от смещения оси цилиндра, смещение оси поршневого пальца (рис. 1.7) является весьма распространенным, особенно в высокооборотных двигателях легковых автомобилей. Например, на двигателях ВАЗ (ЧН 8,2/7,6) это смещение достигает 1 мм. Конструктивные параметры такого КШМ те же, что и в механизме со смещением оси цилиндра – R, L, e, λ, k . Основным преимуществом этого типа КШМ является уменьшение шума, вызываемого перекладкой поршней. Под перекладкой понимают изменение направле-

ния силы N при прохождении поршнем верхней и нижней мертвых точек.

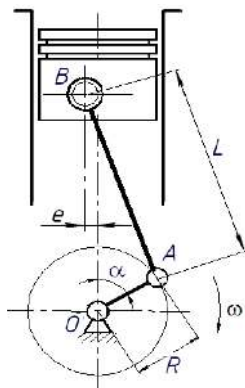


Рис. 1.7. КШМ со смещением оси поршневого пальца

В центральном КШМ эта перекладка происходит мгновенно и сопровождается ударом поршня о стенку цилиндра; в КШМ со смещением поршневого пальца этот процесс растянут во времени (рис. 1.8).

Перейдем к рассмотрению механизмов многорядных двигателей. Они различаются по способу соединения нескольких шатунов с шатунной шейкой коленчатого вала. Наиболее простым является последовательное расположение двух чаще всего одинаковых шатунов в *V*-образных (или двухрядных)⁶ двигателях (рис. 1.9). Эта схема отличается конструктивной и технологической простотой (а потому наиболее приспособлена для массового производства). Однако при ее использовании увеличивается длина коленчатого вала (это неблагоприятно с точки зрения возникновения крутильных колебаний), а шатунная шейка испытывает изгиб в связи с тем, что усилия со стороны последовательно расположенных шатунов действуют в разных плоскостях.

⁶ В двигателях с большим числом рядов цилиндров, как правило, применяются другие типы сочлененных механизмов. Известны лишь отдельные примеры трехрядных двигателей с последовательным расположением трех шатунов на шейке коленчатого вала (такой КШМ, в частности, имел опытный двигатель 18ЧН 14/14 Ярославского моторного завода, построенный в середине 1980-х гг.

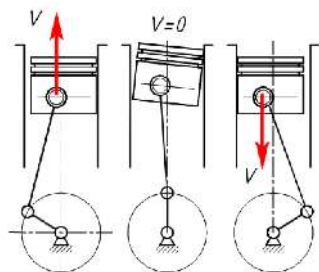


Рис. 1.8. Последовательные положения поршня в КШМ со смещением поршневого пальца в момент прохождения верхней мертвой точки:
 V – скорость поршня.

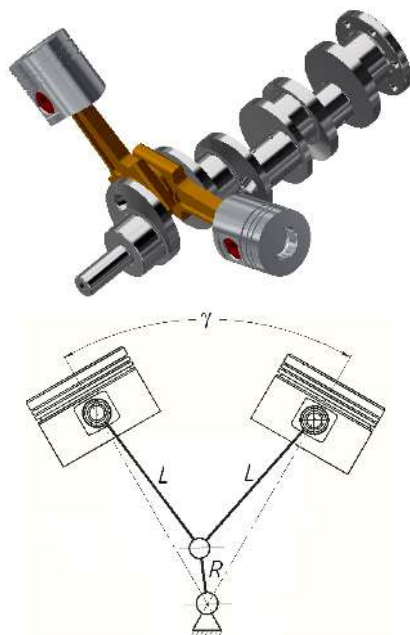


Рис. 1.9. Пространственная модель КШМ V-образного двигателя с последовательным расположением шатунов на шейке коленчатого вала и его кинематическая схема

К конструктивным параметрам таких КШМ относятся ранее упомянутые радиус кривошипа R и длина шатуна L , а также угол развала цилиндров γ (его величина зависит от числа цилиндров и схемы заклинки кривошипов коленчатого вала). Независимой текущей переменной является угол α поворота коленчатого вала, отсчитываемый от оси первого цилиндра до кривошипа (о нумерации цилиндров сказано ниже). Следует заметить, что КШМ многорядных двигателей также могут иметь смещения осей поршневых пальцев или цилиндров. Последний вид смещения обязательно применяется в одной из особых конструкций V-образных двигателей, которые часто называют VR-двигателями (этот термин иногда связывают с немецким названием Verkürzt Reihenmotor, т. е. укороченный рядный двигатель). Разработчики таких двигателей предприняли попытку уменьшить длину рядного двигателя при том же числе цилиндров (рис. 1.10, 1.11). Для этого соседние цилиндры были установлены в блоке в шахматном порядке под углом γ , величина которого не превышала 15° . Кривошип коленчатого вала, с которым связаны поршни одного отсека, должен иметь смещенные шатунные шейки, а для предотвращения соударений поршней оси цилиндров левого и правого рядов должны быть установлены со смещениями e_1 и e_2 . В двигателях Volkswagen TSI ($S/D=75,6/76,5$ мм) смещения e_1 и e_2 соответственно равны 12,5 и $-12,5$ мм⁷ (здесь задача снижения боковых сил не ставилась). Днища поршней выполняются под углом к их осям (см. рис. 1.10), что позволяет использовать для всех цилиндров общую головку. Однако такое исполнение поршней может затруднить использование VR-компоновки для дизелей. Кроме того, шатуны VR-двигателей должны иметь малую толщину (в упомянутых двигателях Volkswagen TSI максимальная толщина шатунов составляла всего 13 мм), что также не благоприятствует реализации дизельного рабочего процесса по условиям прочности (тем не менее упомянутая линейка двигателей для легковых автомобилей фирмы Volkswagen включает и дизели).

⁷ Ниже будет показано, что смещения осей цилиндров в противоположных направлениях приводит к незначительному различию законов движения поршней левого и правого цилиндров.

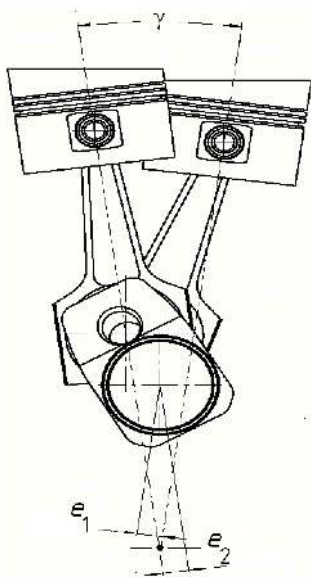


Рис. 1.10. Конструктивная схема двухцилиндрового отсека VR-двигателя

Подобную конструкцию (с шахматным расположением цилиндров) могут иметь двигатели с так называемым продолженным расширением, что способствует повышению экономичности и улучшению экологических характеристик двигателя. Некоторые конструкции таких двигателей имеют три цилиндра, один из которых (средний) имеет больший диаметр по сравнению с двумя другими (рис. 1.12, 1.13) [10].

Сообщается об успешных испытаниях одного из таких трехцилиндровых двигателей с параметрами: $V_h = 1,478$ л, $N_B = 100$ кВт, $n = 7000$ мин⁻¹, $(M_B)_{\max} = 166$ Н·м при 5500 мин⁻¹, $g_B = 226$ г/(кВт·ч). Испытания опытного бензинового двигателя ($V_h = 0,75$ л, $N_B = 100$ кВт, $n = 7000$ мин⁻¹, $\epsilon = 14,5$) с продолженным расширением, проведенные фирмой Ilmor Engineering⁸, показали возможность су-

⁸ См. интернет-ресурс: www.ilmor.co.uk.

щественного уменьшения расхода топлива по сравнению с двигателем традиционной конструкции).

Обе разновидности сочлененных КШМ позволяют устранить недостатки схемы с последовательным размещением, а именно: уменьшить длину коленчатого вала и самого двигателя и устранить изгиб и перерезывание шатунной шейки силами, действующими на нее в различных плоскостях. КШМ с вильчатым шатуном показан на рисунке 1.14; его кинематическая схема совпадает с таковой для механизма с последовательным расположением шатунов (см. рис. 1.9). Основным недостатком этой схемы КШМ является конструктивное и технологическое усложнение. В современном двигателестроении эта схема практически не используется, хотя в прежние годы она часто применялась в авиационном моторостроении (в частности, вильчатые шатуны имели двигатели ВК-105, ВК-107, DB-605, Allison-1710, Napier Deltic и др.



Рис. 1.11. Общий вид блока цилиндров VR-двигателя⁹

⁹ Фото с сайта http://youwheel.com/home/wp-content/uploads/2016/08/VR6_Block.jpg.

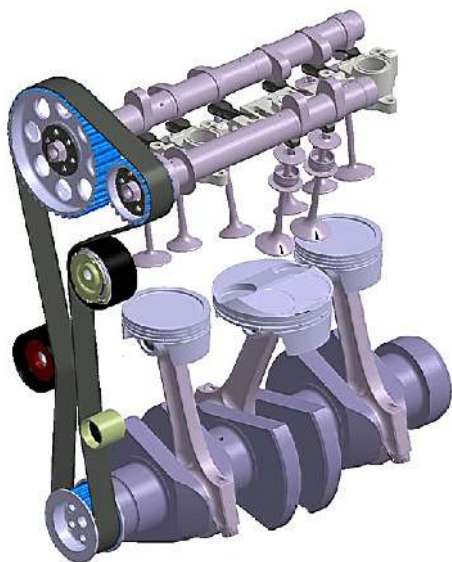


Рис. 1.12. Устройство КШМ трехцилиндрового двигателя с продолженным расширением¹⁰



Рис. 1.13. Блок цилиндров двигателя с продолженным расширением¹¹

¹⁰ Фото с сайта www.auto-power-girl.com.

¹¹ Фото с сайта www.bikepost.ru.

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru