

*А.В. Белогуб, д-р техн. наук, В.А. Пылев, д-р техн. наук,
А.А. Зотов, канд. техн. наук, Е.А. Глишко, канд. техн. наук*

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ 3-D МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОРШНЯ

Введение

Практически любой новый (разрабатываемый) автомобильный компонент должен быть легче, конструктивно проще, технологичнее старого, сохранять работоспособность весь период эксплуатации и способствовать повышению технического уровня автомобиля в целом, т.е. цель проектировщика – создать конструкцию легкую, прочную и долговечную. При этом компонент должен быть реализован потребителю. Важно, что указанные условия должны быть системно гарантированы используемой технологией проектирования с учетом эффективной поддержки соответствующих этапов жизненного цикла (ЖЦ). Реализация той или иной технологии конструкторского проектирования сложных технических систем сегодня основывается на средствах универсальных CAD-CAE пакетов. В этой связи особенности таких технологий в значительной степени определяются используемыми методами проектирования. Для разработки эффективных методов прохождения этапов ЖЦ компонента, связанных с непосредственным его проектированием, необходимо разрешить следующие два недостатка универсальных АС. Это неучет специфики конкретной конструкции и отсутствие должного аппарата описания трудноформализуемой специальной информации [1,2].

В рассматриваемом примере – проектировании поршня автомобильного ДВС – выделены следующие подэтапы ЖЦ:

- трехмерное геометрическое моделирование аналогов и прототипа;
- синтез внутренней поверхности нового изделия;
- моделирование теплового и силового воздействия на конструкцию;
- анализ качества нового изделия в сравнении с известными аналогами;
- синтез внешней боковой поверхности поршня.

Общая схема этих этапов приведена на рис. 1.

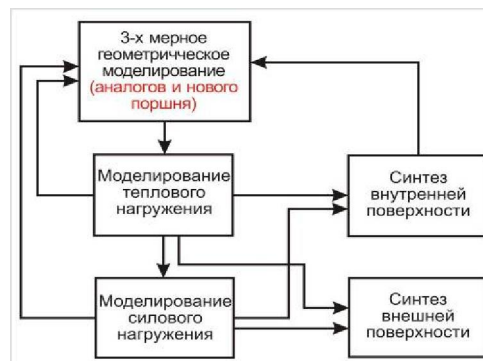


Рис. 1. Схема прохождения подэтапов ЖЦ поршня, связанных с непосредственным проектированием

Настоящая статья посвящена технологии создания геометрических моделей автомобильных поршней.

Особенности синтеза трехмерных геометрических моделей автомобильных поршней ДВС

В контексте принципа сквозного проектирования создание трехмерной модели поршня происходит неразрывно с созданием модели отливки, что позволяет производить изменения в обеих моделях одновременно. С этой целью совмещается 3D-модель поршня и его отливки в одном рабочем файле. Различные конфигурации содержат одни и те же элементы в дереве построения и отличаются друг от друга совокупностью активных и пассивных элементов. В частности, в конфигурации отливки поршня пассивны элементы, имитирующие механическую обработку. Сказанное выше приводит к первоначальному представлению о простоте **решения задачи автоматизации процесса минимизации массы тонкостенного поршня, как об основной задаче конструирования** [1]. Поэтому рассмотрим известные подходы к решению задачи минимизации массы.

Первый из них – это следование определенным рекомендациям, нормативам, стандартам, в которых заложен опыт "предыдущих поколений". Эти документы создавались и создаются различными путями, включая систематизацию предыдущего опыта и экспериментальную проработку проблемы. Исходя из такого подхода, считается, что

для определенного уровня форсирования двигателя имеет место рекомендованное схемное решение конструкции поршня [3]. При этом не исключены и случаи, когда доводы разработчиков рекомендаций не до конца понятны проектировщикам. Тем не менее, в подавляющем большинстве случаев соблюдение нормативов есть наиболее надежный и быстродостижимый путь решения задачи проектирования.

Но такой подход не позволяет реализовать концепцию постоянного совершенствования поршня – когда двигатель требует замены поршневой группы, на замену поступит поршень прежней конфигурации, выполненный с учетом известных нормативов и рекомендаций.

Другой подход решения задачи минимизации массы противоположен первому и предполагает использование алгоритмов оптимального проектирования. Здесь известно укрупненное деление алгоритмов на параметрические и те, которые связаны с анализом чувствительности. Цель первых – подбор переменных, описывающих геометрию (это наиболее распространенный случай), характеристик материалов, параметров армирования материалов и т. д. Анализ чувствительности предполагает получение формы тела, удовлетворяющей заданным требованиям. Одним из различий между методами является то, что параметрическая оптимизация предполагает описание формы тела через некоторые параметры. Затем эти параметры учитываются при построении объекта. Далее строится геометрическая модель, после чего для нее выполняются необходимые расчеты.

Принципиально для реализации процедуры параметрической оптимизации необходимо выполнить следующее [1,2]:

- 1) создать геометрическую модель объекта проектирования;
- 2) убедиться, что система размеров сформирована так, чтобы те, которые будут являться переменными проектирования, являлись управляющими, проверить возможность перестроения модели при изменении каждого из этих размеров;
- 3) проверить возможность построения сетки конечных элементов (КЭ) для исходного варианта геометрии, а также при изменении размеров, которые будут ассоциироваться с переменными проектирования.

В целом эффект от процедуры оптимизации здесь ожидается за счет автоматизации процесса

перестроения геометрической модели с последующим анализом решений на требуемом количестве шагов поиска оптимума. При этом автоматизация процесса невозможна без типизации геометрической модели.

Предположим, что поставленную задачу будем решать с использованием достаточного количества типовых параметризованных геометрических моделей поршней. При этом обратимся к рис. 2 и табл. 1.

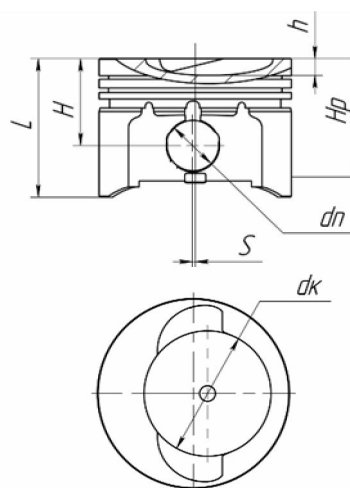


Рис. 2. Основные геометрические параметры тонкостенного поршня

Из рисунка видно, что поршень имеет 8 основных геометрических параметров. Это D , H , H_p , L , S , d_n , h , d_k . Все они, а также геометрия КС, заданы разработчиком двигателя, поэтому геометрическая модель создается сразу в размерах этих фиксированных параметров. Вся же остальная совокупность параметров должна быть варьированной.

В табл. 1 представлены значения фиксированных, а также количество варьированных конструктивных параметров 10 разработанных в ПАО «АВТРАМАТ» геометрических моделей поршней. Здесь количество варьированных параметров изменится в пределах от 68 до 173, что существенно велико для применения метода пространства параметров [4], т.к. рекомендации относительно количества необходимых пробных точек в выбранном конструктором пространстве параметров на сегодня отсутствуют. Также важно, что параметризация конечно-элементной модели даже в системах высокого уровня (ANSYS, NASTRAN, COSMOS/M) в силу значительной сложности этой задачи для общего случая произвольного объекта отсутствует. Это приводит к прекращению попыток параметризации всего цикла исследований [5].

Таблица 1. Фиксированные и прочие параметры тонкостенных поршней ДВС

№ п/п	Наименование поршня	D, мм	dn, мм	dk, мм	H, мм	h, мм	Описание КС	Прочие геометрические параметры, всего
1.	2457.1004015H	72	20	50	33,75	1,9	2 выборки и КС	130
2.	317.1004015	75,5	20	42x61	34,15	4,15	2 выборки и КС	130
3.	2101-1004015	76,0	22	-	37,9	-	отсутствует	114
4.	21011-1004015	79,0	22	55	37,9	1,9	КС	102
5.	2105-1004015M-У	82,0	22	44x62	37,9	4,6	2 выборки и КС	147
6.	21124-1004015H	82,0	22	-	39,13	-	4 выборки	123
7.	21126-1004015M	82,0	18	-	25,55	-	4 выборки	173
8.	21128-1004015H	82,0	19	73	26,2	2	4 выборки и КС	128
9.	406. 1004015H	92	22	-	38,14	-	4 выборки	125
10.	421. 1004015M	100	25	78	43,5	4	КС	68

Таким образом, ввиду особенностей проектирования автомобильного поршня, где количество геометрических примитивов велико, а в процессе реализации проекта их число варьируется, задача автоматической оптимизации даже в ее постановке, связанной с типизацией будущих решений, крайне затруднительна, предлагается *неалгоритмическая методика получения геометрических моделей поршней, основанная на использовании проектировщиком моделей нечетких смысловых отношений.*

Полагаем, что проектировщик всегда имеет дело с конкретным поршнем, основные геометрические параметры которого – D , d_n , d_k , H , h и геометрия КС (см рис.2), заданы разработчиком двигателя. Поэтому геометрическая модель создается сразу в размерах этих неварьируемых параметров.

Создание 3D-модели начинаем с создания модели его отливки. Данный нюанс тем существеннее, чем сложнее модель изделия, поэтому для моделирования поршня ДВС этот момент является особо важным. В предлагаемой технологии геометрического моделирования все изменения, производимые в модели заготовки, автоматически происходят и в модели готового изделия.

Приведем основные этапы создания 3D-модели поршня.

1. Формирование начальной геометрии.
2. Формирование дополнительной геометрии отливки.
3. Формирование скруглений.
4. Зеркальное отображение.
5. Формирование элементов механической обработки.
6. Формирование элементов эквивалентных площадок.

7. Масштабирование.

8. Создание конфигураций.

Первым действием при формировании начальной геометрии является создание полностью параметризованного эскиза (рис.3а), в результате вращения на 180° которого будет получена основная геометрия отливки поршня (рис.3б). Здесь важным моментом является принцип выбора положения исходной точки при проектировании. С целью унификации и сохранения единообразия при проектировании поршней и оснастки для его изготовления приняты следующие правила: исходный эскиз создается в плоскости «Plan1»; исходная точка совпадает с продольной осью поршня; ось отверстия под поршневой палец лежит в плоскости «Plan2».

В первую очередь необходимо создать основную геометрию отливки: головка, юбка, бобышки и боковые стенки. Уже на этом этапе огромную роль играет опыт проектанта, позволяющий ему создать эскиз, который в дальнейшем не потребует существенных изменений.

Поскольку припуски на механическую обработку практически всегда известны и связаны с применяемой технологией (могут быть назначены технологом по запросу в режиме реального времени), то начало 3D-моделирования от проектирования заготовки не приводит к затруднениям у проектировщика, связанным с заданием первичных размеров.

На рис. 4 приведены иллюстрации к построению геометрической модели: а) – тело поршня и бобышка; б) – «холодильник» и КС; в) – скругления; г) – отливка; д) – поршень; е) – поршень, подготовленный для модельного силового нагружения.

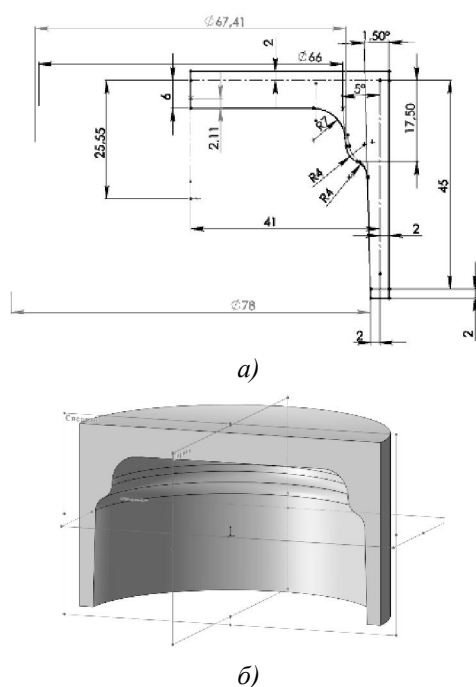


Рис. 3. Этапы формирования 3D-модели поршня 21126-1004015M:

а – параметризованный эскиз первой операции;
б – расположение 3D-модели относительно основных плоскостей и исходной точки

Продольная ось поршня должна проходить через исходную точку, а ось отверстия под поршневой палец должна лежать в горизонтальной плоскости – это необходимые требования для унификации процесса проектирования поршня и упрощения проектирования литейной и другой технологической оснастки. Далее формируем более мелкие детали (дополнительная геометрия), такие как маслосливные каналы (получаемые в отливке), камера сгорания, выборки для снятия стопорных колец и прочие (рис. 4б). Скругления следует делать ближе к завершению модели отливки (рис. 4в), так как они в большей степени усложняют модель и требуют дополнительных ресурсов компьютерной техники. В это же время формируем литниковую систему, необходимую для проектирования литейной оснастки и сетку для создания центров кристаллизации. Далее выполняем зеркальное отражение детали для получения целой заготовки поршня (рис. 4г). В конечной фазе следует создавать элементы, имитирующие механическую обработку поршня: формируется отверстие под поршневой палец, наружная поверхность доньшка и юбки, канавки под поршневые кольца, базовые поверхности на торцевой поверхности юбки, сверления, фаски и прочие элементы (рис. 4д). Далее добавляются элементы эквивалентных площадок для расчетной модели (рис. 4е).

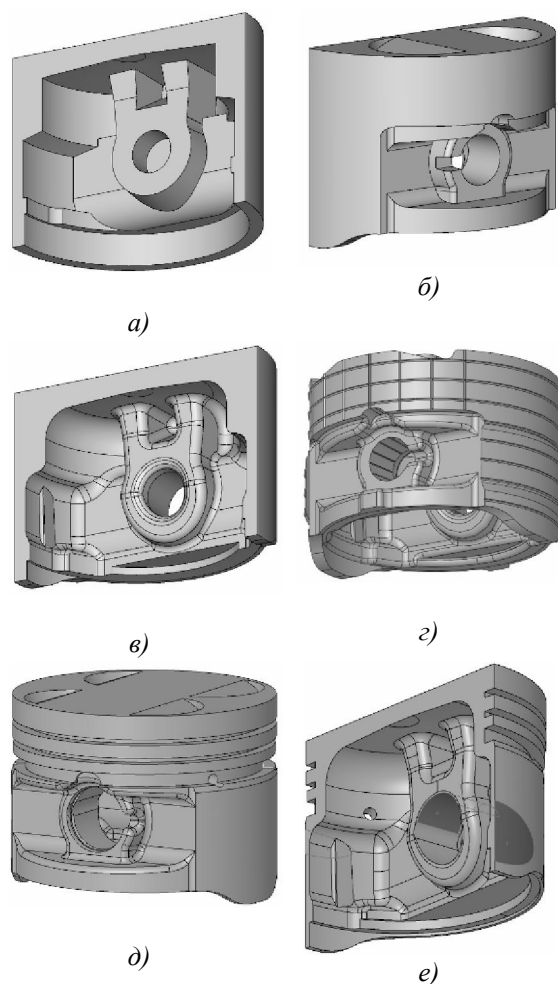


Рис. 4 Этапы построения 3D-модели поршня (406.1004015H)

В завершение применяем масштабирование для получения горячей отливки (в соответствующей конфигурации), как модели которая необходима для создания литейной оснастки.

Следует подчеркнуть, что программный продукт (например, пакет SolidWorks) обеспечивает многовариантность в решении задачи 3D-моделирования и определяющим всегда является решение конструктора, выбирающего те или иные команды и принципы построения трехмерного объекта. Т.е. одни и те же геометрические тела можно получить, используя различный набор команд, составив эти объемы из того или иного множества примитивов. И чем сложнее итоговый объект, тем большее количество возможных вариантов могут быть использованы для решения поставленной задачи.

Этот выбор определяется конструктором и носит субъективный характер, на который влияет опыт работы, квалификация. Только конструктор может оценить ситуацию и заменить множество

примитивов одним сложным элементом, что позволит сбалансировать такие противоречивые параметры как сложность (трудоемкость) построения 3D-объекта и удобство (простоту) его изменения. Все выше перечисленные аспекты и определяют то, каким образом будет параметризован 3D-объект, что в дальнейшем окажет влияние на удобство работы с ним.

Рассмотрим примеры построения таких элементов поршня, как бобышка под поршневой палец, «холодильник» и камера сгорания.

Обычно, для формирования бобышки удобно использовать эскиз, расположенный в плоскости, параллельной плоскости «Plan1» и смещенной от неё на величину, равную половине расстояния между бобышками, и команду «Бобышка-Вытянуть» (рис. 5а). Далее формируем необходимые уклоны-усилители (рис. 5б), и выборки (рис. 5в) при помощи команд «Бобышка-Вытянуть» и «Вырез-Вытянуть», соответственно. Для выполнения скоса в нижней части бобышки можно использовать эскиз в плоскости «Plan3», как показано на рис. 5г и команду «Вырез-Вытянуть». На рис. 5д показано выполнение литейных уклонов по контуру бобышки при помощи команды «Уклон».

«Скругления» выполняем на заключительном этапе, когда сформирована окружающая геометрия (рис. 5е). Эта операция выполняется за несколько действий и очередность их выполнения играет важнейшую роль в формировании желаемой геометрии.

Здесь и в ниже следующих примерах показаны основные действия по формированию главных элементов поршня и опущены вспомогательные построения и вспомогательная геометрия (плоскости для эскизов и пр.). А также не рассматривается построение других элементов поршня, неразрывно связанных с основными элементами и необходимыми для их создания, с целью локализации основных операций. Однако следует понимать, что при моделировании такого сложного объекта, как тонкостенный поршень современного ДВС необходимо выполнить гораздо больший объем работы, чем приведено в данном описании, а сам процесс моделирования – сложный процесс принятия решений, обусловлен многовариантностью решений. Например, формирование бобышки неразрывно связано с формированием «холодильника», а камеры сгорания – с доньшком поршня (внутренней его поверхности).

«Холодильник» является важным элементом поршня. Их геометрия в значительной мере определяет жесткость конструкции и массу поршня. Рассмотрим построение плоского «холодильника» поршня ВАЗ-21083М.

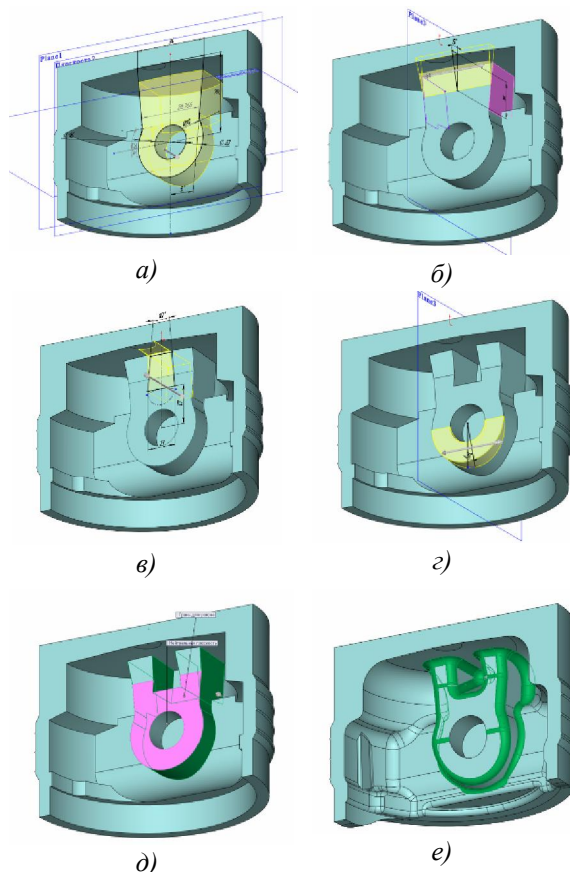


Рис. 5. Этапы построения бобышки поршня

Обычно целесообразно получить основную геометрию «холодильника» прямым вырезом (рис. 6а). Затем формируем выборки окон для масло-сброса (рис. 6б) и бобышку (рис. 6в), в которой вырезаем сквозное отверстие эскизом, расположенным на внутренней стороне бобышки (рис. 6г). Далее следует подрезка нижней части «холодильника» и юбки поршня, в результате которой формируются «ушки» в нижней части поршня (рис. 6д). Затем выполняем скругления (рис. 6е), которые физически невозможно реализовать после выреза (рис. 6ж), в результате которого формируется центральное окно для сброса масла. На заключительном этапе выполняем остальные необходимые скругления (рис. 6з).

Другой важный элемент – КС автомобильных поршней – обычно имеет форму тел вращения и может состоять из двух объемов: собственно камеры сгорания и выборок под клапана (см. табл. 1).

Также возможны варианты, когда присутствует какой-либо один объем, как, например, в поршне ЗМЗ-406, где камера сгорания состоит из 4 выборок под клапана.

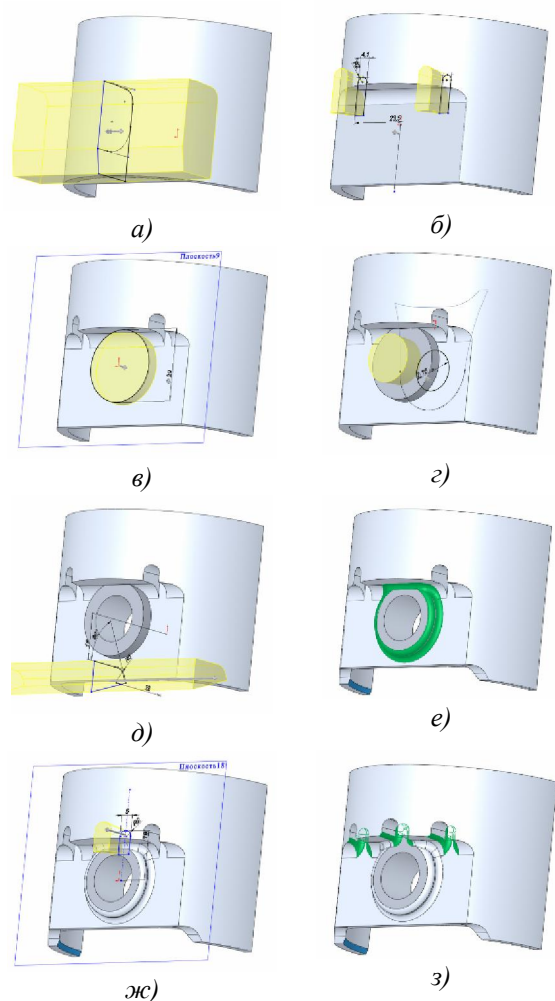


Рис. 6. Этапы построения «холодильников» поршня VA3-21083M

На рис.7а,б показаны этапы создания КС поршня VA3-21213H, а на рис.7 в-е – поршня VA3-21083M.

В целом получение нового решения предполагает не только варьирование значениями конструктивных параметров прототипа, а и удаление одних и внесение других графических примитивов в модель. Это позволяет конструктору изменять собственно набор параметров, в том числе – путем расширения известного множества параметров поршней-аналогов.

Сузить объемы поиска здесь удастся на основе системы определенных предпочтений, которыми руководствуется проектировщик [2]. Поэтому система предпочтений является неотъемлемой частью

разработанной методики. Здесь рекомендации, связанные с конструкторским проектированием, должны формироваться на основе взаимосвязи между формоизменением аналога либо новым формообразованием тонкостенного поршня и его термомеханической напряженностью. При этом проектировщик не имеет каких-либо ограничений, накладываемых на область поиска предпочтительных конструктивных параметров, кроме обеспечения качества ЖЦ конструкции, не хуже, чем у аналогов [2]. Очевидно, что взаимосвязь геометрии поршня с особенностями технологического проектирования аналогичны.

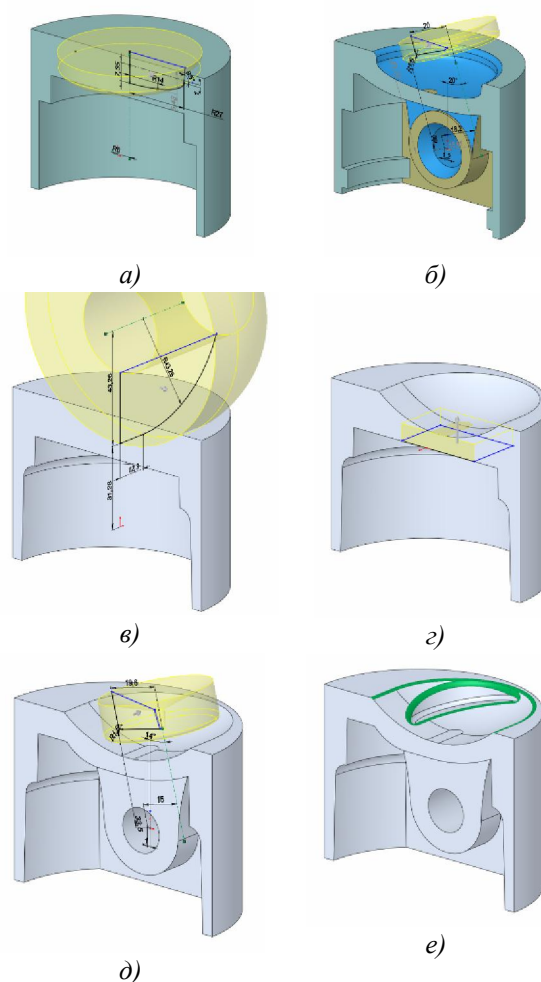


Рис. 7. Этапы построения КС поршня

Выводы

Предложена методика получения геометрических моделей тонкостенных поршней, которая не является алгоритмической, а основана на использовании проектировщиком моделей нечетких смысловых отношений. Такой подход позволяет не только отказаться от неэкономичных алгоритмов автоматического синтеза, анализа и оптимизации

параметризованої моделі, но і отримувати нові конструктивні рішення, теоретично переважають кращі зразки-аналогії.

Список літератури:

1. Комп'ютерне моделювання в інженерній практиці / [Алямовський А.А., Собачкін А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Пономарев Н.Б.]. – С-Петербург: БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с. 2. Белогуб А.В. Підтримка життєвого циклу тонкостінних поршней ДВС на основі технології інтегрованого проектування і виробництва / А.В. Белогуб // *Всхідноєвропейський журнал передових технологій*. – 2010. – №3. – С. 27-40. 3. Пильов В.О. Автоматизоване проектування поршнів швидкодійних дизелів із заданим рівнем тривалої міцності / В.О. Пильов. – Харків: Видавничий центр НТУ «ХПІ», 2001. – 332 с. 4. Соболев І.М. Вибір оптимальних параметрів в задачах з багатьма критеріями / І.М. Соболев, Р.Б. Статников. – М.: Наука, 1985. – 110 с. 5. Акімов О.В. Наукові основи конструкторсько-

технологічного проектування литих деталей ДВС: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук: спец. 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки» / О.В. Акімов. – Харків, 2009. – 36 с.

Bibliography (transliterated):

1. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoj praktike / [Aljamovskij A.A., Sobachkin A.A., Odincov E.V., Haritonovich A.I., Ponomarev N.B.]. – S-Peterburgjo: BHV-Peterburg, 2008. – 1040 s. 2. Belogub A.V. Podderzhka zhiznennogo cikla tonkostennykh porshnej DVS na osno-ve tehnologii integrirovannogo proektirovanija i proizvodstva / A.V. Belogub // *Vostochnoevropejskij zhurnal peredovykh tehnologij*. – 2010. – №3. – S. 27-40. 3. Pil'ov V.O. Avtomatizovane proektuvannja porshniv shvidkohidnih dizeliv iz zadanim rivnem trivaloi micnosti / V.O. Pil'ov. – Harkiv: Vidavnicnij centr NTU "HPI", 2001. – 332 s. 4. Sobol' I.M. Vybora optimal'-nyh parametrov v zadachah so mnogimi kriterijami / I.M. Sobol', R.B. Stannikov. – M.: Nauka, 1985. – 110 s. 5. Akimov O.V. Naukovi osnovi konstruktors'ko-tehnologichnogo proektuvannja litih detalej DVZ: avto-ref. dis. na zdobuttja nauk. stupenja doktora tehn. na-uk: spec. 05.05.03 «Dviguni ta energetichni ustanovki» / O.V. Akimov. – Harkiv, 2009. – 36 s.

УДК 621.43

В.П. Матейчик, д-р техн. наук, М.П. Цюман, канд. техн. наук, В.А. Ніколаєнко, інж.

ДОЦІЛЬНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ КОМБІНОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ПОРШНЕВОГО БЕНЗИНОВОГО ДВИГУНА З ВІДКЛЮЧЕННЯМ ЧАСТИНИ ЦИЛІНДРІВ

Вступ. Основними джерелами енергії на автомобільному транспорті є поршневі двигуни, а їх паливна економічність є однією з основних характеристик. Як відомо, характерною особливістю бензинових поршневих двигунів є значне погіршення їх паливної економічності в режимах малих навантажень і холостого ходу при регулюванні їх потужності дроселюванням паливоповітряної суміші.

Тому, впродовж багатьох років провідними світовими двигунобудівниками, спеціалізованими науковими лабораторіями, зокрема і на кафедрі «Двигуни і теплотехніка» Національного транспортного університету, проводяться експериментальні дослідження альтернативних методів регулювання потужності поршневих бензинових двигунів, зокрема методу відключення частини циліндрів при роботі двигуна в режимі малого навантаження і холостого ходу [1–4].

З іншого боку, до важливих показників двигуна можна віднести і динамічні показники, зокрема рівномірність крутного моменту та рівномірність ходу, так як вони викликають коливання кутової швидкості і впливають на надійність деталей двигуна, що обертаються та трансмісії автомобіля,

деталей підвіски двигуна та викликають дискомфорт водія та пасажирів [5].

Оскільки при застосуванні комбінованого методу регулювання потужності двигуна з відключенням частини циліндрів показники рівномірності ходу можуть погіршуватись, важливо їх врахувати при оцінці ефективності застосування такого методу регулювання потужності.

Метою даної статті є визначення доцільності регулювання потужності поршневого бензинового двигуна комбінованим методом з відключенням частини циліндрів з врахуванням показників паливної економічності та рівномірності ходу двигуна.

Математична модель. З метою дослідження показників паливної економічності і рівномірності ходу двигуна пропонується математична модель, що ґрунтується на положеннях методики моделювання робочого процесу методом об'ємного балансу [6]. Базова математична модель дозволяє розрахувати індикаторні і ефективні показники двигуна, зокрема питому ефективну витрату палива з врахуванням основних конструктивних і регулювальних параметрів двигуна.