

АНАЛИЗ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПОРШНЕВОГО W-ОБРАЗНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПРИЦЕПНЫМИ ШАТУНАМИ

А.П. Маслов¹, Ю.В. Рождественский², Е.А. Задорожная², М.В. Левцов²

¹ ГСКБД «Трансдизель» ООО «ЧТЗ-УРАЛТРАК», г. Челябинск, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

В данной статье представлен анализ и результаты аналитических, расчетных и конструкторских решений, направленных на реализацию задач по развитию отечественного рынка разработки поршневых (тракторных, автомобильных, авиационных и специальных) двигателей. Авторами предложена оригинальная конструкция W-образного двигателя с прицепными шатунами и выполнен сравнительный анализ особенностей конструкции. Основной особенностью предложенной W-образной конструкции двигателя является существенное уменьшение его длины, а следовательно, длины коленчатого вала. Как известно, процесс изготовления коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания является длительной, сложной и дорогой процедурой по количеству технологических операций как по его механической, так и по термической обработке. При этом важным аспектом при конструировании коленчатого вала являются работы по расчету механической напряженности, крутильным колебаниям, а также оценке гидромеханических характеристик коренных и шатунных подшипников, включая и уравниваемость двигателя в целом. В конце статьи представлены три схемы организации работы секции двигателя (авторами принято, что секция – это четыре поршня, два главных и два прицепных шатуна, кинематически связанных с одной шатунной шейкой). Представленные конструкторские отличия от классических схем кривошипно-шатунного механизма (КШМ) позволяют организовывать работу W-образного двигателя в соответствии с задачами, стоящими перед разработчиками. Например, реализация максимальной мощности обеспечивается применением варианта *a* с повышением силовой и тепловой напряженности деталей цилиндропоршневой группы двигателя (ЦПГ), при организации работы секции по варианту *b* и *в* – нагруженность деталей КШМ возрастает, но нагруженность деталей ЦПГ снижается. Учитывая, что представленная W-образная конструкция двигателя с прицепными шатунами имеет одинаковый ход поршней в главном и боковом цилиндрах, а характер протекания рабочего процесса в каждом цилиндре идентичен и сдвинут по углу поворота коленчатого вала, что позволит организовывать работу двигателя по вышепредставленным вариантам, эксплуатационные характеристики такого двигателя существенно расширяются за счет электронного управления организацией работы секции. Дальнейшим продолжением работ для развития данной тематики авторы считают выполнение полного комплекса расчетных исследований с учетом конструктивных особенностей двигателя с W-образной конструкцией КШМ.

Ключевые слова: W- и V-образные двигатели, коленчатый вал, секция, прицепной шатун, главный и боковой цилиндры, главный и прицепной шатуны, инерционные и газовые силы, сила «Т», сила «Z», одинаковый ход поршней в главном и боковом цилиндрах.

Введение

Исторически сложилось, что поршневые двигатели получили широкое распространение не только в наземной, но и в авиационной технике. В начале двадцатого века авиационные двигатели представляли собой простые маломощные машины, которые разрабатывались и строились одна за другой для конкретных самолетов. Но очень скоро двигатели начали производиться в больших количествах, часто несколькими производителями в разных странах, получившими лицензию от проектировщика или первоначального производителя [1–6]. В последнее время поршневое двигателестроение для авиационной промышленности приобрело особое звучание в плане развития БПЛА и легкомоторной авиации. В этой связи некоторые технические решения, разработанные в плане развития авиационного поршневого двигателестроения, предложенные авторами в этой статье, могут быть полезны в решении задач, стоящих перед специалистами, занимающимися вопросами проектирования и изготовления авиационных поршневых двигателей. По мнению авторов, это будет способствовать созданию отечественного рынка разработок новых конструкций, актуальность которого направлена на обеспечение суверенитета авиационной промышленности России, основы которого были заложены работами отечественных специалистов [7–9].

Очевидно, что для участия в разработках новых конструкций и в работах по созданию отечественного рынка авиационных поршневых двигателей необходимо знать требования и технические характеристики малогабаритных авиационных поршневых двигателей. В этой связи работы, выполненные специалистами [10, 11], представляют определенный практический интерес.

Как известно, одним из важнейших показателей авиационного поршневого двигателя является его удельная масса, которая для современных двигателей составляет 0,4...0,6 кг/кВт. Еще одним важным критерием являются потери мощности на трение, которые должны составлять не менее 10...15 % от номинальной мощности двигателя [8].

Таким образом, вопрос реализации поршневого двигателя, имеющего необходимые и достаточные массогабаритные показатели, наряду с мощностными и трибомеханическими характеристиками является одним из основных направлений, развиваемых авторами при проработке конструкции W-образного двигателя с прицепными шатунами. В этой связи работы, выполненные авторами [12–14], по анализу характера периодических и случайных нагружений, а также W-двигателей представляются в достаточной мере актуальными. Двигатели такой конструкции довольно часто используются в автомобильной промышленности [15]. К автомобилям с двигателем W относятся: VW Phaeton [16], Audi A8 [17], Bentley Continental GT [18] и Bugatti Veyron [19], а также многие другие, менее известные автомобили. Перечень различных модификаций W-образного двигателя представлен в обзоре [20]. Концепция W двигателя представлена в программе [21], которая знакомит читателя с механическими компонентами и их функциями в двигателях семейства W. В статье [22] объясняются основные отличия между возможными типами расположения цилиндров (рядное, V и W) в автомобильных двигателях.

По мнению авторов, для современных беспилотных устройств массогабаритные показатели двигателей имеют преобладающее значение. Следовательно, разработка компактных двигателей с заданными техническими параметрами, с возможностью автоматического регулирования напряженности деталей ЦПГ и КШМ без существенного изменения мощностных параметров является задачей исследований.

На рис. 1 представлены конструкции W-образного двигателя с прицепными шатунами (авторский вариант), W-образного двигателя производства концерна Volkswagen [23] и V-образного двигателя с прицепными шатунами. Как следует из рис. 1, длины коленчатых валов и блок-картеров W-образных конструкций двигателей существенно меньше по сравнению с их V-образной конструкцией. Существенный вклад в расчетные исследования, посвященные надежности коленчатых валов, представлены в работах [24, 25].

Как видно из описания конструкции двигателя Volkswagen, шатунная шейка имеет две оси (см. рис. 1), которые смещены относительно друг друга как по высоте, так и по углу поворота между осями, что создает дополнительные сложности при изготовлении такого коленчатого вала.

Учитывая, что предлагаемая авторами конструкция коленчатого вала проще в изготовлении, то и затраты на производство этого вала будут меньше. Кроме этого, вес коленчатого вала этого двигателя будет в два раза меньше, чем у V-образного и почти в полтора раза меньше, чем у W-образной конструкции Volkswagen. Следовательно, и амплитуда крутильных колебаний при прочих равных геометрических размерах будет меньше [23–25]. При этом жесткость такого коленчатого вала будет выше, что будет способствовать уменьшению амплитуды крутильных колебаний коленчатого вала и, соответственно, повышению надежности его трибосопряжений. Теоретический анализ, представленный в работах [26, 27], с использованием современных методов оценки кинематических схем представляет практический интерес.

Конструкция W-образного двигателя

Особенность предлагаемого двигателя с прицепными шатунами заключается в создании кинематической схемы, включающей в себя два главных шатуна, параллельно расположенных на одной шатунной шейке.

При этом прицепные шатуны, сочлененные с главными, образуют кинематическую схему, обеспечивающую определенную последовательность взаимного расположения поршней, находящихся в цилиндрах каждого ряда двигателя. Общий вид этой кинематической схемы представлен на рис. 2.

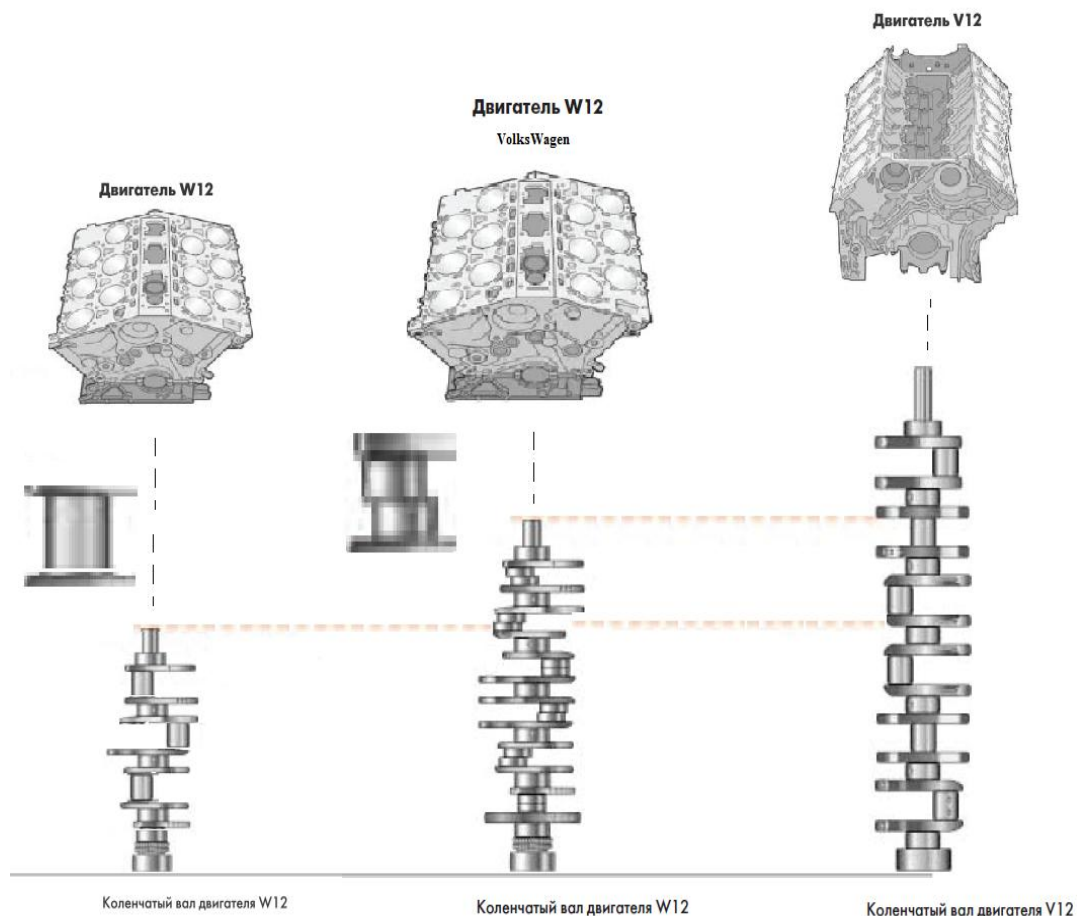


Рис. 1. Сравнение длин блок-картеров и коленчатых валов 12-цилиндровых двигателей

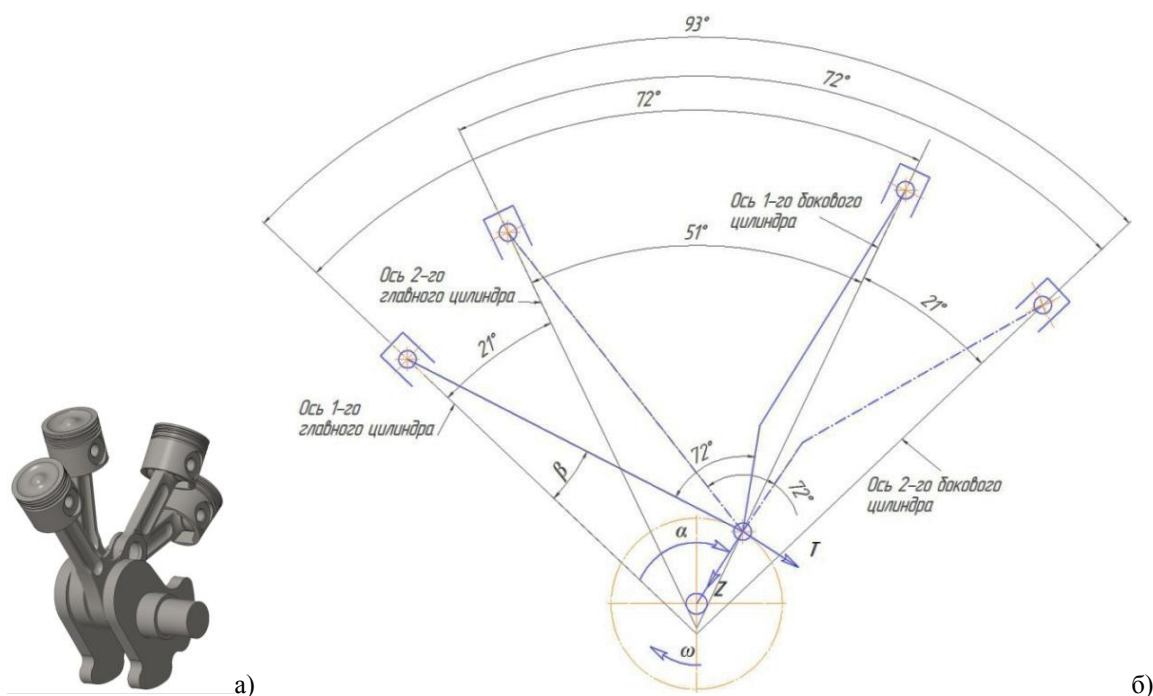


Рис. 2. 3D-модель секции W-образного двигателя: а) его кинематическая схема б): Т – направление тангенциальной силы на ось цапфы кривошипа; Z – направление нормальной силы на оси цапфы кривошипа; α – угол поворота кривошипа; β – угловое перемещение шатуна от оси цилиндра; ω – направление угловой скорости вращения коленчатого вала

Расчет и конструирование

Особенность данной кинематической схемы заключается в том, что последовательность нахождения поршней в определенной точке (симметричной относительно оси коленчатого вала) хода зависит от угла развала цилиндров в блоке и от угла развала блоков двигателя.

Для удобства описания конструкции авторы применили термин «секция». Секция – это четыре поршня с двумя главными и двумя прицепными шатунами, конструктивно сочлененные на одной шатунной шейке (рис. 2 а и б).

Графическая зависимость положений поршней от угла поворота коленчатого вала (ПКВ) наглядно представлена на рис. 3.

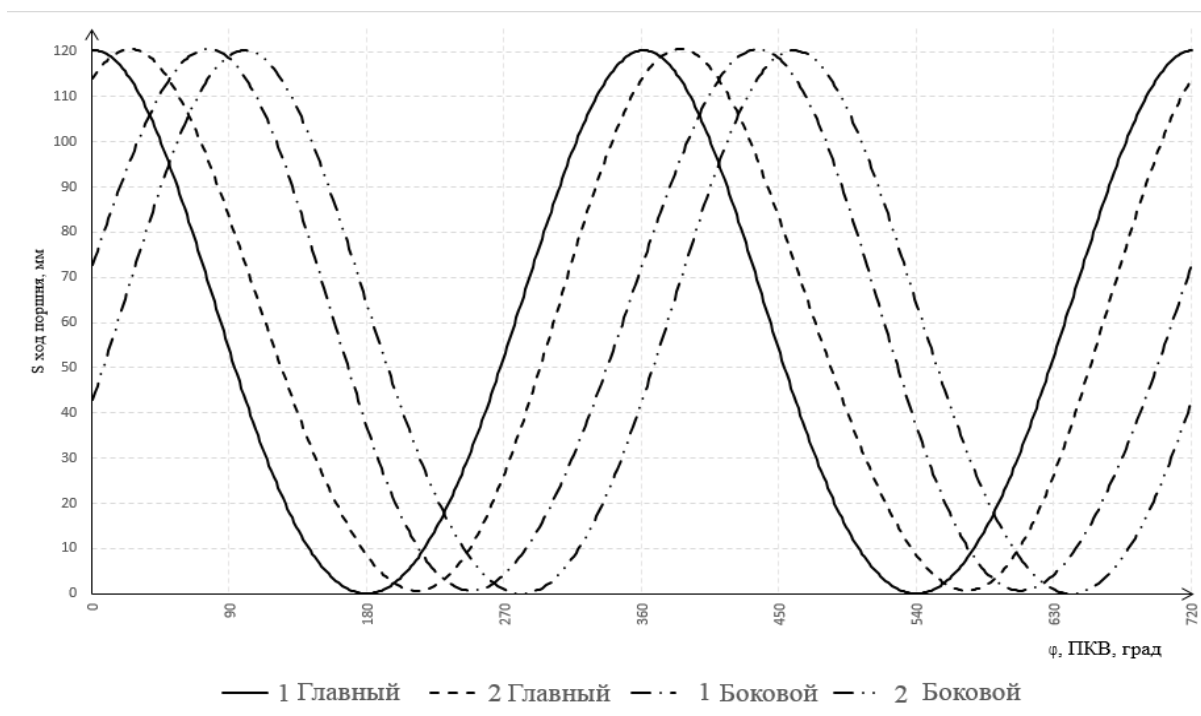


Рис. 3. Графики хода поршней секции W-образного двигателя

Логический анализ рис. 2 и 3 позволяет отметить, что если поршень первого главного цилиндра находится в верхней мертвой точке (ВМТ), то поршень второго главного цилиндра и поршни боковых цилиндров достигнут аналогичных точек соответственно через период времени, равный углу ПКВ при совпадении оси кривошипа с осями цилиндров двигателя. Разница значений этих углов будет равна разнице углов между осями соответствующих цилиндров.

В качестве объекта исследований был рассмотрен двигатель размерностью 10/12, мощность которого при частоте вращения коленчатого вала 3400 мин⁻¹ равна 588 кВт. Смещение осей цилиндров (дезаксаж) равно 15,5 мм, угол развала цилиндров между соответствующими головками блоков равен 72 градусам, а угол развала между цилиндрами одного ряда составляет 21 градус. Некоторые результаты выполненных авторами работ представлены в журнале «Двигателестроение» [28, 29].

Результаты расчетных исследований 12-цилиндрового W-образного виртуального двигателя позволяют оценить технические особенности виртуального двигателя, такие как взаимное расположение и характер последовательного движения поршней в главных и боковых цилиндрах в зависимости от угла поворота коленчатого вала. Можно отметить, что каждый поршень приходит в ВМТ своего цилиндра в строгой последовательности: первый главный при «0 град. ПКВ»; второй главный при «21 град. ПКВ»; первый боковой при «72 град. ПКВ» (21 + 51); второй боковой при «93 град. ПКВ» (72 + 21). Это соответствует особенностям ориентации осей цилиндров, то есть их расположению в строгом соответствии со значениями углов ПКВ и кинематической схемы, представленной на рис. 2б.

Как представлено на рис. 3, продолжительность такта «Рабочий ход» в секции происходит в течение 273 град. ПКВ в период с 360 до 633 градусов, в то время как у классического двигателя

продолжительность такта «Рабочий ход» составляет 180 град. ПКВ от 360 до 540 градусов. Следовательно, воздействия газовых сил на детали КШМ в секции относительно классической схемы работы двигателя, продолжительнее на 93 град. ПКВ.

При этом следует учитывать, что тепловое воздействие распределено на четыре цилиндра, а силовое распределяется на два шатунных подшипника скольжения в виде силы «Т» (см. рис. 2б), где сила «Т» характеризует силу, определяющую изменение вращающегося момента. Значение силы складывается из воздействия сил, возникающих в каждом из четырех цилиндров секции.

Варианты организации работы W-образного двигателя

Анализ кинематики и динамики предложенного W-образного механизма позволяет утверждать о возможности управления тактами работы двигателя. Это может быть исполнено следующим образом: при движении поршней от ВМТ в двух цилиндрах секции можно организовать такт «Впуск», а в двух других – такт «Впуск» или такт «Рабочий ход» организацией подачи топлива в цилиндры, а при движении поршней от НМТ в двух цилиндрах можно организовать такт «Сжатие», а в двух других – такт «Сжатие» или такт «Выпуск». Кроме этого, следует учесть, что невозможно организовать в двух цилиндрах секции такт «Впуск» или «Рабочий ход», а в двух других цилиндрах – такт «Сжатие» или «Выпуск», так как в этом случае два поршня должны двигаться от ВМТ, а два поршня – к ВМТ, что конструктивно невозможно, как это показано на рис. 4.

Как видно из графиков, после отметки 453 градуса ПКВ все поршни секции перемещаются от ВМТ к НМТ, соответственно, последовательно в каждом цилиндре можно организовать такт «Впуск» или «Рабочий ход».

Таким образом, организация конкретного такта в каждом цилиндре секции позволит изменить порядок воздействия на сопрягаемые детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ) и кривошипно-шатунного механизма (КШМ) за счет изменения тактов в цилиндрах двигателя. Организация работы двигателя по различным вариантам представлена на рис. 5, 6, 7.

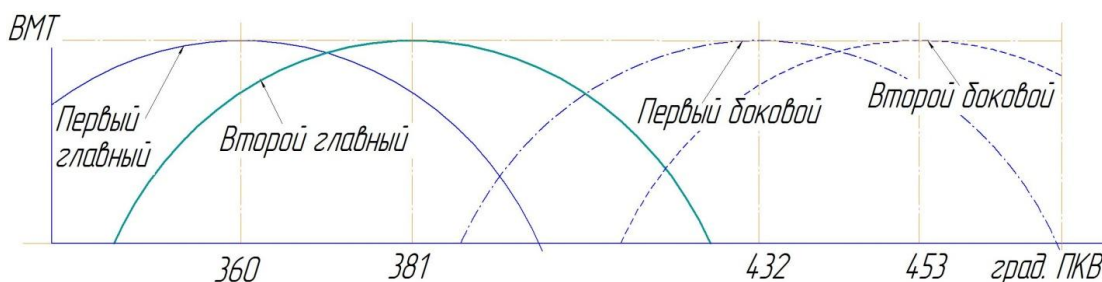


Рис. 4. Графики расположений поршней секции в ВМТ

Для оценки работы тепловой и силовой нагруженности секции W-образного двигателя по вариантам (а, б, в) организации рабочего цикла необходимо учитывать следующие принципиальные конструктивные особенности:

1. Детали ЦПГ первого и второго главных цилиндров относятся к левой стороне блока цилиндров, а детали ЦПГ первого и второго боковых цилиндров относятся к правой стороне блока цилиндров.

2. Детали ЦПГ первого и второго главных цилиндров аналогично деталям ЦПГ первого и второго боковых цилиндров конструктивно располагаются близко друг к другу.

3. Первый и второй шатунные подшипники конструктивно располагаются на одной шатунной шейке.

4. Детали ЦПГ первого главного и первого бокового цилиндров конструктивно связаны с первым шатунным подшипником.

Детали ЦПГ второго главного и второго бокового цилиндров конструктивно связаны со вторым шатунным подшипником.

Анализ тепловой и силовой нагруженности деталей двигателя

Организация работы двигателя по варианту «а»

При организации работы двигателя по варианту «а» можно отметить следующий отрицательный фактор: такт «Впуск» начинается во втором главном, в первом и втором боковых ци-

Расчет и конструирование

линдрах, с периодичностью в 21, 72 и 93 градуса ПКВ от начала такта «Впуск» в первом главном цилиндре. Тогда взаимное влияние процессов сгорания в первом и втором главных цилиндрах аналогично взаимному влиянию в первом и втором боковых цилиндрах на детали ЦПГ и будет максимальным, так как эти цилиндры конструктивно располагаются близко и в одном ряду.

К положительным факторам можно отнести то, что силовое влияние воздействия на детали КШМ, в частности на шатунную шейку коленчатого вала, складывающееся из суммарного воздействия газовых и инерционных сил, действующих в первых главном и боковом цилиндрах, с соответствующим смещением по углу ПКВ газовых и инерционных сил, действующих во вторых главном и боковом цилиндрах, воздействует на разные шатунные подшипники, разнесенные как по длине шатунной шейки, так и по координатному углу, что позволяет реализовать большую мощность двигателя и большой крутящий момент, так как на такте «Рабочий ход» действующие газовые силы складываются в определенной последовательности, что позволяет пролонгировать действие газовых сил на шатунную шейку на 92 градуса ПКВ, как это показано на рис. 5.

К следующему положительному фактору можно отнести то, что силовое воздействие на шатунные подшипники скольжения разнесено как по координатному углу оси шатунной шейки, так и по разным подшипникам скольжения, которые расположены на одной шатунной шейке.

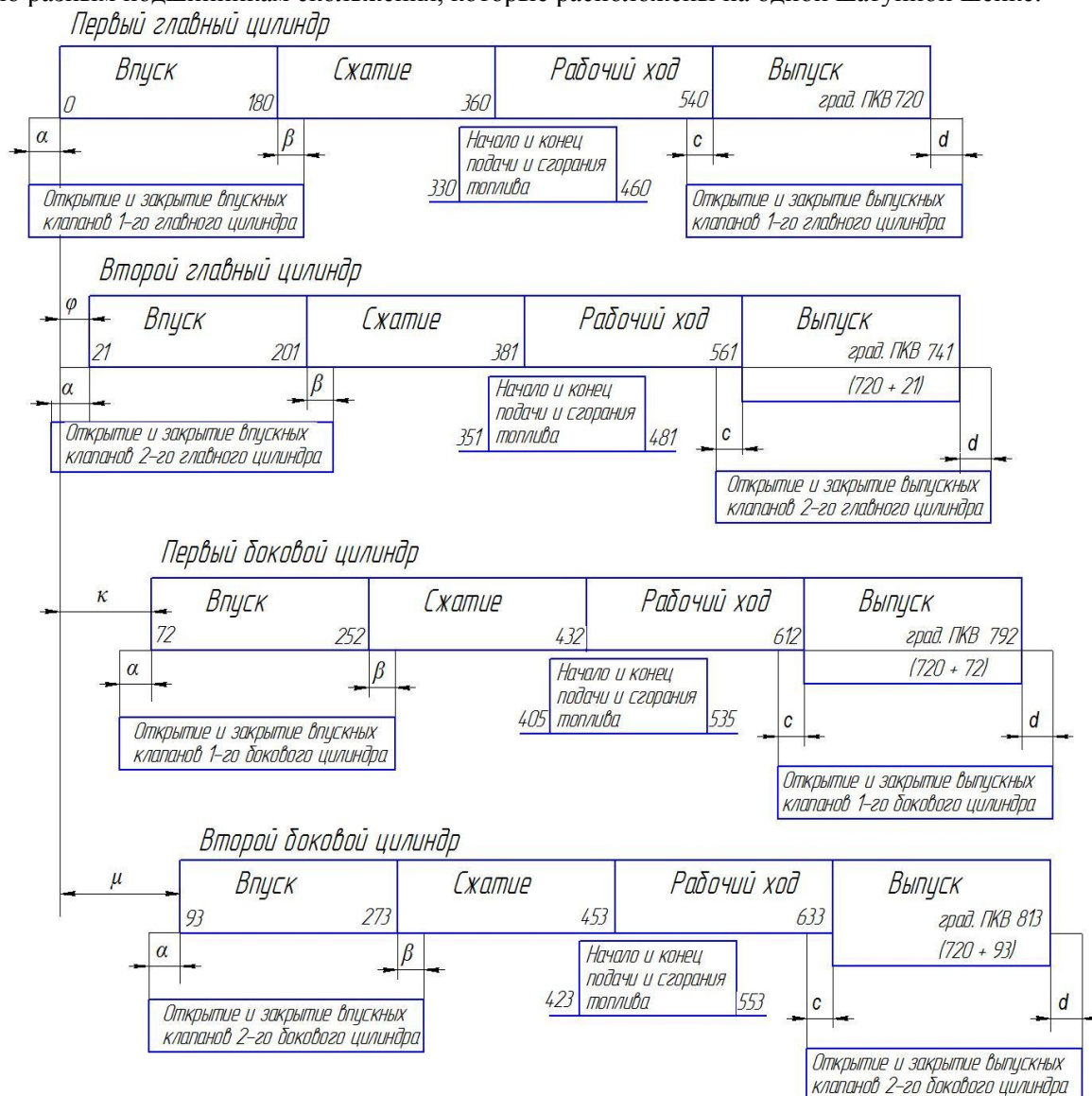


Рис. 5. Схема работы одной секции W-образного двигателя с прицепными шатунами (вариант «а»), где: α, β, с, d – моменты открытия и закрытия клапанов, которые определяются временем изодома электромагнитного клапана и гидравлической системы, φ, κ, μ – начало тактов в цилиндрах секции двигателя

Организация работы двигателя по варианту «б»

При организации работы двигателя по варианту «б» можно отметить следующие отрицательные факторы:

– локальная суммарная мощность и момент будут меньше вследствие разделения такта «Рабочий ход» в цилиндрах как по углу ПКВ, так и по координатному углу, составляющему 72 градуса ПКВ;

– нагрузка на каждый шатунный подшипник возрастет, так как суммарное силовое воздействие от процессов, происходящих в первых главном и боковом цилиндрах, а также во вторых главном и боковом цилиндрах, будет суммироваться.

К положительным факторам можно отнести то, что когда такт «Впуск» начинается в первых главном и боковом цилиндрах, а во вторых главном и боковом цилиндрах начинается такт «Рабочий ход», тогда взаимное влияние тепловых процессов, происходящих в цилиндрах, где реализуется такт «Рабочий ход», будет минимальным, так как они расположены в разных блоках.

Силовое влияние от процессов, происходящих в цилиндрах, на тактах «Рабочий ход» будет меньше вследствие их смещения на 72 градуса ПКВ по координатному углу.

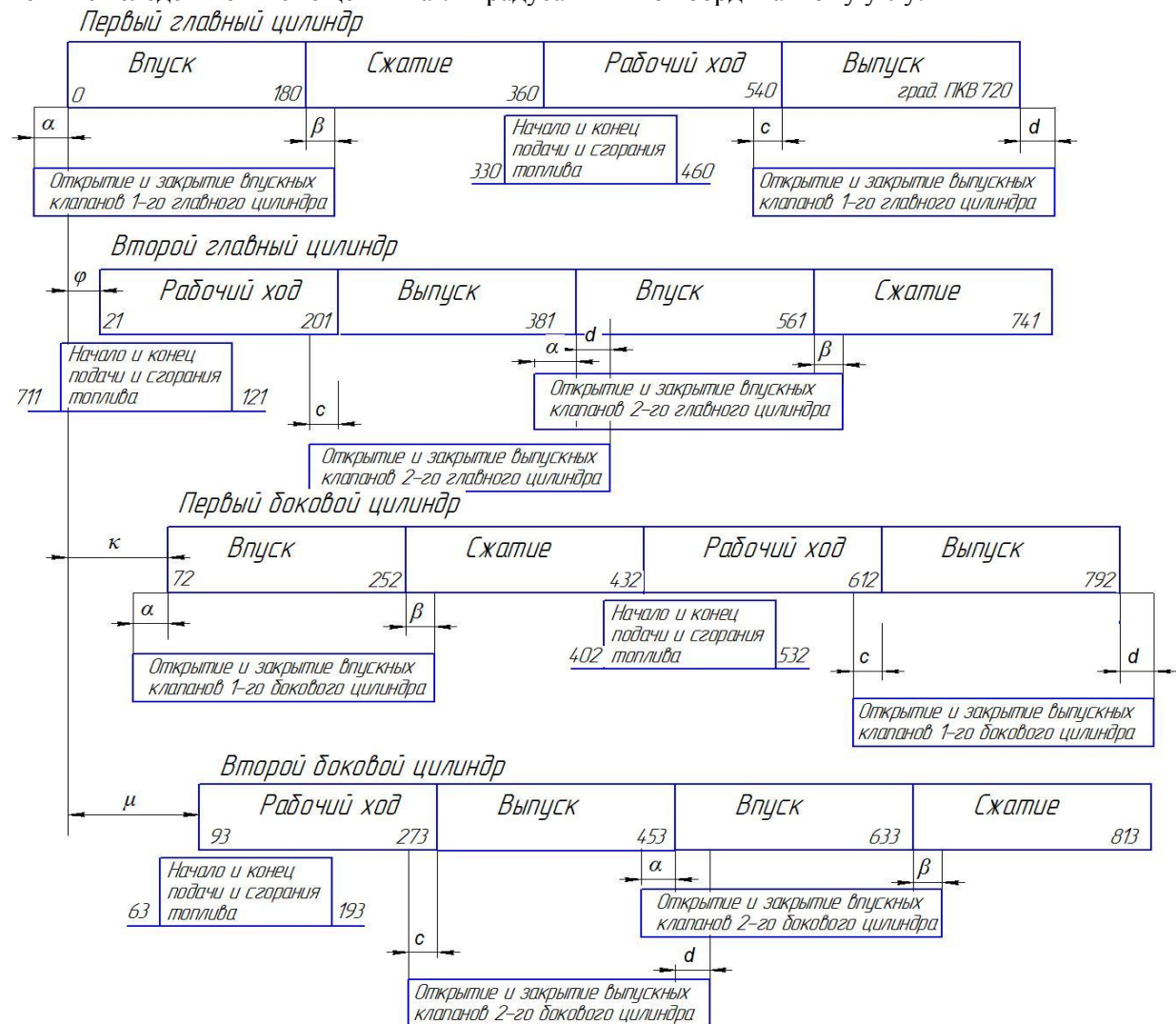


Рис. 6. Схема работы одной секции W-образного двигателя с прицепными шатунами (вариант «б»)

Организация работы двигателя по варианту «в»

При организации работы двигателя по варианту «в» можно отметить такие отрицательные факторы, как:

Расчет и конструирование

– суммарная мощность и момент будут больше, чем при организации работы двигателя по варианту «б» вследствие разделения такта «Рабочий ход» в цилиндрах как по углу ПКВ, так и по координатному углу, составляющему 21 градус ПКВ;

– взаимное влияние тепловой нагрузки на первый и второй главные цилиндры для деталей ЦПП возрастет, так как цилиндры конструктивно расположены рядом, в одном блоке.

К положительным факторам можно отнести то, что нагрузка на каждый шатунный подшипник снизится, так как суммарное силовое воздействие от процессов, происходящих в главных, а также в боковых первом и втором цилиндрах, будет осуществляться для разных шатунных подшипников и будет растянута по длине шатунной шейки.

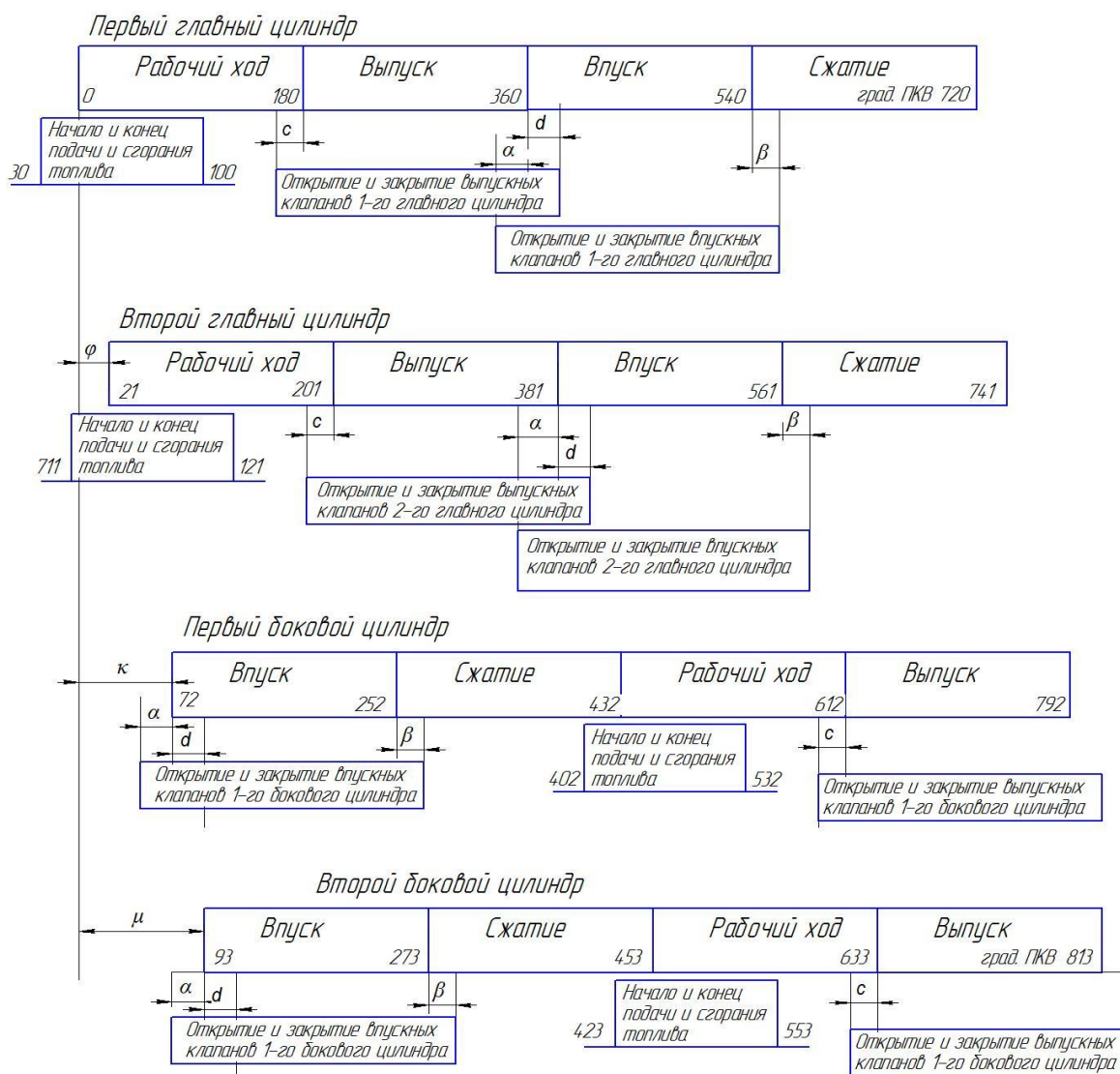


Рис. 7. Схема работы секции W-образного двигателя с прицепными шатунами (вариант «в»)

Результаты расчетного анализа

Сравнительные результаты логического анализ организации работы секции двигателя целесообразно оценить на анализе характера изменения суммарной силы «Т» (характеризующей вращательный момент) в зависимости от вариантов организации работы двигателя.

Как видно из анализа характера изменения силы «Т» (рис. 8), при использовании различных вариантов организации работы двигателя, можно отметить следующее:

– при использовании варианта «а» продолжительность и амплитуда действия силы «Т» на участке хода поршней от 360 до 600 град. ПКВ выше, чем при использовании вариантов «б» и «в»;

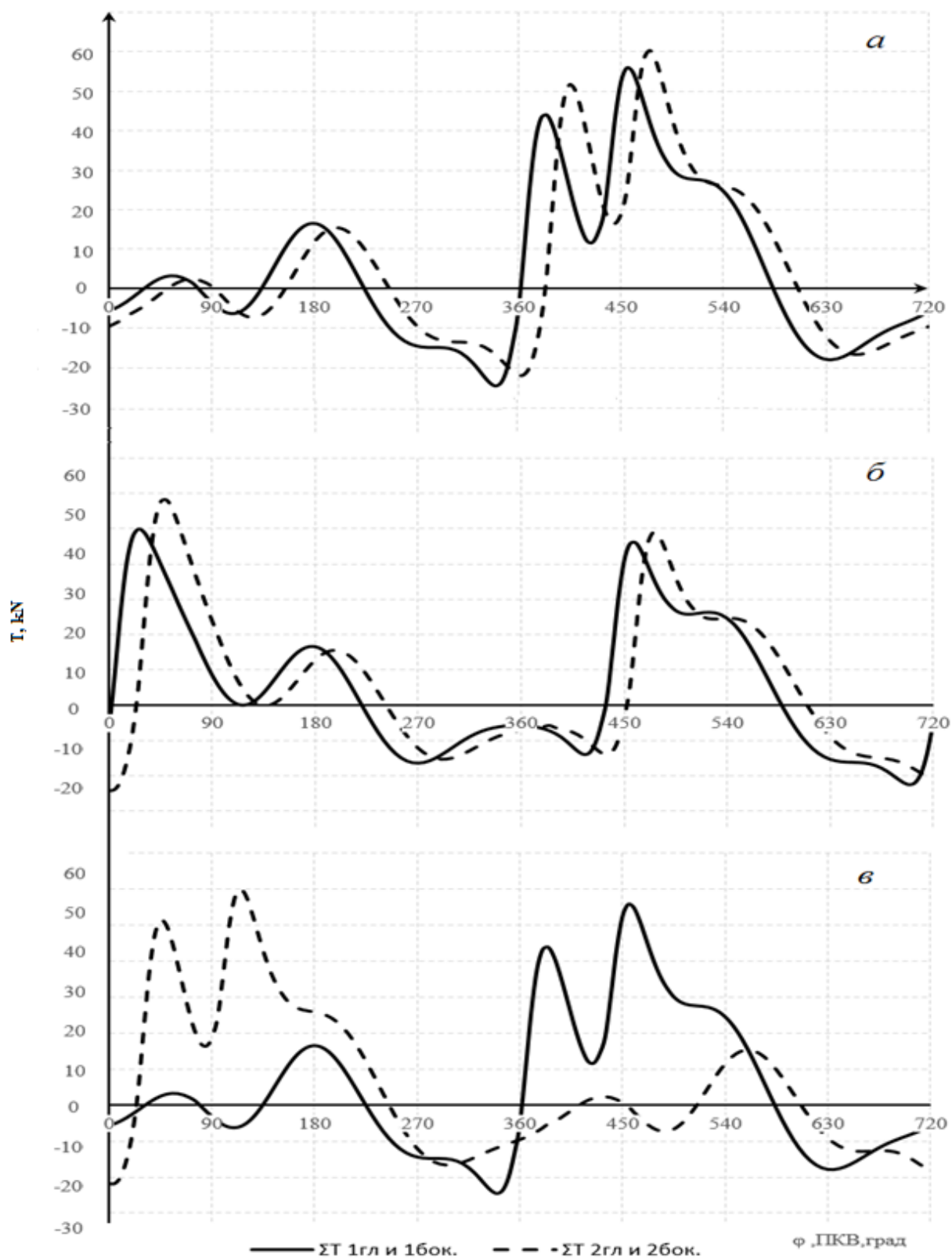


Рис. 8. Характер изменения силы «Т» при организации работы двигателя по вариантам «а», «б», «в»

Расчет и конструирование

– при использовании варианта «б» можно отметить снижение амплитуды и продолжительность действия силы «Т» на участке хода поршней от 420 до 600 град. ПКВ, а также возникновение двух пиков на участке хода поршней от 0 до 240 град. ПКВ;

– при использовании варианта «в» можно отметить снижение амплитуды и продолжительность действия силы «Т» на участке хода поршней от 360 до 600 град. ПКВ, а также возникновение двух пиков на участке хода поршней от 30 до 240 град. ПКВ.

Выводы

1. Графический анализ кинематических схем показал преимущество W-образной кинематической схемы двигателя как по массогабаритным показателям, так и по амплитуде крутильных колебаний, так как длина коленчатого вала W-образного двигателя существенно меньше.

2. Графический анализ хода поршней секции показал, что организация тактов работы двигателя может быть осуществлена в каждом цилиндре только как «впуск и рабочий ход» или как «сжатие и выпуск», так как на основной части хода поршней в секции они перемещаются или от ВМТ или к ВТМ.

3. Развертки круговых диаграмм работы секции наглядно позволяют оценить напряженность деталей ЦПГ и КШМ с учетом развала цилиндров, их расположения в каждом ряду, а также с учетом такта работы двигателя в каждом цилиндре.

4. Предварительный анализ характера изменения силы «Т» при организации работы двигателя по вариантам показал, что положительная направленность действия силы «Т» составляет для варианта «а» – 58 %, «б» – 60 % и «в» – 66 % рабочего цикла двигателя.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание на выполнение фундаментальных научных исследований № FENU-2023-0013 (2023013ГЗ)).

Литература

1. Angelucci E., Matricardi P. *World Aircraft: Origins – World War I*. Chicago, Rand McNally. 1975. 320 p

2. Bilstein R.E. *The American Aerospace Industry*. New York: Twayne Publishers. 1996. 280 p.

3. Monday D. (ed) *The International Encyclopedia of Aviation*. New York: Crown Publishers, Inc. 1977. 480 p.

4. Patillo D. *Pushing the Envelope: The American Aircraft Industry*. Ann Arbor, Mich.: The University of Michigan Press. 2000, 484 p.

5. *National Museum of the United States Air Force*. – <https://www.nationalmuseum.af.mil/>. (дата обращения 10.05.2023 г.)

6. *Early Aircraft Engines* – <https://www.centennialofflight.net/essay/Aerospace/earlyengines/Aero4.htm>. (дата обращения 10.05.2023 г.)

7. Нейман И.Ш. *Динамика и расчет на прочность авиационных моторов*. (Справочник). Часть 1 – кинематика и динамика авиационных моторов. ОНТИ НКТП СССР. Государственное авиационное автотракторное издательство. Москва – Ленинград. 1933. С. 20 – 22.

8. Кузьмин Г.А. *Конструкция авиационных двигателей*. М.: Оборонгиз, 1962. 443 с.

9. Биргер И.А. и др. *Авиационные поршневые двигатели. Кинематика, динамика и расчет на прочность (пособие для инженеров)*. М.: Государственное издательство оборонной промышленности. 1950. С. 17–44.

10. Вибе И.И. *Тепловой расчет двигателя внутреннего сгорания (уточненный метод)*. Челябинск, 1972. 100 с.

11. Гоц А.Н. *Кинематика и динамика кривошипно-шатунного механизма поршневых двигателей: учебное пособие*. Владимир. 2014. 142 с.

12. Григорьев Е.А. *Периодические и случайные силы, действующие в поршневом двигателе*. – М.: Машиностроение. 2002. 272 с.

13. Чайнов Н.Д., Вальехо Мальдонадо П.Р. *Уравновешивание моментов двигателя VR5 с учетом дезаксажа и угла развала цилиндров*. // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2020. № 5. С. 41–49. DOI: 10.18698/0536-1044-2020-5-41-49.

14. Вальехо Мальдонадо П.Р., Гришин Д.К., Чайнов Н.Д. Кинематический и динамический расчеты кривошипно-шатунного механизма с прицепным шатуном V-образного двигателя внутреннего сгорания с применением программы Mathcad. М.: МГМУ «МАМИ», 2012. 120 с.
15. Engineering Hall of Fame: The Volkswagen “W” Engine and the Bugatti W16. <https://partsolutions.com/engineering-hall-of-fame-the-volkswagen-w-engine-and-the-bugatti-w16>. (дата обращения 10.05.2023 г.)
16. Volkswagen Phaeton. 2012. – <https://www.caranddriver.com/news/a15121248/2014-volkswagen-phaeton-future-cars/>. (дата обращения 10.05.2023 г.)
17. Audi MediaCenter/ Engines. – <https://www.audi-mediacycenter.com/en/vorsprung-durch-technik-redefined-the-audi-a8-l-2745/engines-2840>. (дата обращения 10.05.2023 г.)
18. The all-new Bentley continental GT – the definition of luxury grand touring. – <https://www.bentleymedia.com/en/newsitem/784-the-all-new-bentley-continental-gt-the-definition-of-luxury-grand-touring>. (дата обращения 10.05.2023 г.)
19. Bugatti 8.0-litre W16 Engine – the last of its kind. <https://watchilove.com/bugatti-8-0-litre-w16-engine-the-last-of-its-kind>. (дата обращения 10.05.2023 г.)
20. List of all W Type Engine (W3 TO W30). Auto-journalism 2022, № 04. – <https://autojournalism.com/w-type-engine>. (дата обращения 10.05.2023 г.)
21. The W Engine Concept. Self-Study Program Course Number 821203 https://www.eskimo.com/~riffraff/files/W_engines.pdf. (дата обращения 10.05.2023 г.)
22. Ramchandani N. Difference Between Inline, V And W-Engines. 2020. – <https://gaadify.com/difference-between-inline-v-and-w-engines>. (дата обращения 10.05.2023 г.)
23. Volkswagen Group. Семейство двигателей W. – Программа самообучения 248 – Wolfsburg. – С. 10. [Электронный ресурс]. URL: https://www.autodela.ru/assets/files/books/VW/248_W-dvig_W8_W12_Volkswagen.pdf. (дата обращения 10.05.2023 г.)
24. Сегаль В.Ф. Динамические расчеты двигателей внутреннего сгорания. Ленинград: Машиностроение. 1974. 248 с.
25. Попык К.Г. Динамика автомобильных и тракторных двигателей. М.: Высшая школа. 1972. 327 с.
26. Жуков В.А., Яманин А.И. Анализ алгоритмов расчета кинематики кривошипно-шатунных механизмов с прицепными шатунами // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2016. № 2 (36). – С. 107–117.
27. Вырубов Д.Н., Ефимов С.И., Иващенко Н.А. Двигатели внутреннего сгорания. Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей. М.: Машиностроение. 1984. 383 с.
28. Маслов А.П., Левцов М.В. Кинематический и динамический анализ КШМ W-образного двигателя с прицепными шатунами // Двигателестроение. 2019. № 3 (277). С. 27–30.
29. Маслов А.П., Рождественский Ю.В., Левцов М.В. Графоаналитический анализ возможности обеспечения одинакового хода поршней V и W-образных двигателей с прицепными шатунами // Двигателестроение. 2020. № 2 (280). С. 3–8.

Маслов Андрей Петрович, кандидат технических наук, ГСКБД «Трансдизель» ООО «ЧТЗ-УРАЛТРАК», г. Челябинск, malov_a@chtz.ru.

Рождественский Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, зав. каф. «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, rozhdestvenskiiyv@susu.ru

Задорожная Елена Анатольевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, zadorozhnaiaea@susu.ru

Левцов Максим Викторович, студент кафедры «ДВС», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, masichka174@gmail.com

Поступила в редакцию 11 мая 2023 г.

ANALYSIS OF THE KINEMATIC SCHEME OF AN AIRCRAFT PISTON W-SHAPED ENGINE WITH TRAILER CONNECTING RODS**A.P. Maslov**¹, malov_a@chtz.ru**Y.V. Rozhdestvensky**², rozhdestvenskiyv@susu.ru**E.A. Zadorozhnaya**², zadorozhnaiaea@susu.ru**M.V. Levtsov**², masichka174@gmail.com¹ GSKBD "Transdiesel" LLC "ChTZ-URALTRAK", Chelyabinsk, Russian Federation² South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

This article presents the analysis and results of analytical, calculation, and design solutions for the development of piston engines for aircraft (tractors, automobiles, etc.). The authors propose an original design of a W-shaped engine with trailer connecting rods and made a comparative analysis of design features. The main feature of the W-shaped engine design is a significant reduction in length, and, consequently, the length of the crankshaft. As known, the manufacturing of internal combustion engine crankshafts is a long, complex, and expensive procedure requiring a number operations for its mechanical and heat treatment. An important aspect of crankshaft design is the calculation of mechanical tension, torsional vibrations, and the hydraulic performance evaluation of the main and connecting rod bearing, including engine balancing as a whole. At the end of the article the operating schemes of the engine section are presented (the section consists of four pistons, two main and two connecting rods bearing kinematically connected to one crankpin). The design differences from the classical schemes of crank-connecting mechanism (CCM) allow us to design the W-shaped engine in accordance with the technical requirements. For example, maximum power can be achieved by using variant "A", with an increase in the power and heat stress of the parts of the cylinder-piston group (CPG), when the section is organized according to variants "B" or "C", the loading of CCM parts is increased, but the loading of CPG parts is reduced. Considering that a W-shaped engine with trailed connecting rods has a same piston stroke in main and side cylinders and the workflow pattern in each cylinder is identical and is moved at the crankshaft rotation angle – which allows the engine to be designed according to variants above – the performance characteristics of such an engine are significantly expanded due to electronic control. The authors consider continuation of the work in the implementation of a full set of calculation studies taking into account the design features of the engine with a W-shaped design of CCM.

Keywords: W- and V-shaped engines, crankshaft, section, trailer connecting rod, main and side cylinders, main and trailer connecting rod, inertial and gas forces, force "T", force "Z", the same stroke of the pistons in the main and side cylinders.

References

1. Angelucci, Enzo and Matricardi, Paolo. *World Aircraft: Origins – World War I*. Chicago, Rand McNally. 1975. 320 p
2. Bilstein, Roger E. *The American Aerospace Industry*. New York: Twayne Publishers. 1996. 280 p.
3. Mondey, David, General Editor. *The International Encyclopedia of Aviation*. New York: Crown Publishers, Inc. 1977. 480 p
4. Patillo. *Pushing the Envelope: The American Aircraft Industry*. Ann Arbor, Mich.: The University of Michigan Press. 2000, 484 p.
5. *National Museum of the United States Air Force*. <https://www.nationalmuseum.af.mil/>. (accessed 10.05.2023).
6. *Early Aircraft Engines* <https://www.centennialofflight.net/essay/Aerospace/earlyengines/Aero4.htm>. (accessed 10.05.2023).
7. Neiman I.Sh. *Dinamika i raschet na prochnost' aviatsionnykh motorov. (Spravochnik). Chast' 1 – kinematika i dinamika aviatsionnykh motorov*. [Dynamics and strength calculation of aircraft engines. (Directory). Part 1 – kinematics and dynamics of aircraft engines]. ONTI NKTP USSR. State aviation autotractor publishing house. Moscow – Leningrad. 1933. P. 20–22.

8. Kuzmin G.A. *Konstruktsiya aviatsionnykh dvigateley* [Aircraft engine design.] Moscow: Oborongiz. 1962. 443 p.
9. Birger I.A. etc. *Aviatsionnyye porshnevyye dvigateli. Kinematika, dinamika i raschet na prochnost' (posobiye dlya inzhenerov)*. [Aircraft piston engines. Kinematics, dynamics and strength calculation (manual for engineers)]. Moscow: State publishing house of the defense industry. 1950. P. 17–44.
10. Vibe I.I. *Teplovoy raschet dvigatelya vnutrennego sgoraniya (utochnennyy metod)*. [Thermal calculation of an internal combustion engine (refined method)] Chelyabinsk. 1972. 100 p.
11. Gots A.N. *Kinematika i dinamika krivoshipno-shatunnogo mekhanizma porshnevnykh dvigateley: uchebnoye posobiye* [Kinematics and dynamics of the crank mechanism of piston engines: a tutorial.] Vladimir. 2014. 142 p.
12. Grigoriev E.A. *Periodicheskiye i sluchaynyye sily, deystvuyushchiye v porshnevom dvigatele* [Periodic and random forces acting in a piston engine]. Moscow, Mashinostroenie. 2002. 272 p.
13. Chainov N.D., Vallejo Maldonado P.R. [Balancing the moments of the VR5 engine, taking into account the decoking and the angle of the collapse of the cylinders]. *News of higher educational institutions. Engineerin.*, 2020, No. 5, p. 41 – 49, doi:10. 18698/0536-1044-2020-5-41-49. (in Russ)
14. Vallejo Maldonado P.R., Grishin D.K., Chainov N.D. *Kinematicheskiy i dinamicheskiy raschety krivoshipno-shatunnogo mekhanizma s pritsepnym shatunom V-obraznogo dvigatelya vnutrennego sgoraniya s primeneniym programmy Mathcad* [Kinematic and dynamic calculations of a crank mechanism with a trailer connecting rod of a V-shaped internal combustion engine using the Mathcad program]. Moscow, MSMU "MAMI". 2012. 120 p.
15. *Engineering Hall of Fame: The Volkswagen "W" Engine and the Bugatti W16*. <https://partsolutions.com/engineering-hall-of-fame-the-volkswagen-w-engine-and-the-bugatti-w16>. (accessed 10.05.2023).
16. *Volkswagen Phaeton*. 2012. <https://www.caranddriver.com/news/a15121248/2014-volkswagen-phaeton-future-cars/>. (accessed 10.05.2023).
17. *Audi MediaCenter/ Engines*. <https://www.audi-mediacycenter.com/en/vorsprung-durch-technik-redefined-the-audi-a8-l-2745/engines-2840>. (accessed 10.05.2023).
18. *The all-new Bentley continental GT – the definition of luxury grand touring*. <https://www.bentleymedia.com/en/newsitem/784-the-all-new-bentley-continental-gt-the-definition-of-luxury-grand-touring>. (accessed 10.05.2023).
19. *Bugatti 8.0-litre W16 Engine – the last of its kind*. <https://watchilove.com/bugatti-8-0-litre-w16-engine-the-last-of-its-kind>. (accessed 10.05.2023).
20. List of all W Type Engine (W3 TO W30). *Auto-journalism*. 2022, № 04. <https://autojournalism.com/w-type-engine>. (accessed 10.05.2023).
21. The W Engine Concept. Self-Study Program Course Number 821203 https://www.eskimo.com/~riffraff/files/W_engines.pdf. (accessed 10.05.2023).
22. Ramchandani N. *Difference Between Inline, V And W-Engines*. 2020. <https://gaadify.com/difference-between-inline-v-and-w-engines> (accessed 10.05.2023).
23. *Volkswagen Group. Engine family W. – Self-Study Program 248 – Wolfsburg. – C. 10*. [Electronic resource]. URL: http://www.autodela.ru/assets/files/books/VW/248_Wdvg_W8_W12_Volkswagen.pdf. (accessed 10.05.2023).
24. Segal V.F. *Dinamicheskiye raschety dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Dynamic calculations of internal combustion engines]. Leningrad, Mashinostroenie, 1974. 248 p.
25. Popyk K.G. *Dinamika avtomobil'nykh i traktornykh dvigateley* [Dynamics of automobile and tractor engines]. Moscow, Higher School. 1972. 327 p.
26. Zhukov V.A., Yamanin A.I. [Analysis of algorithms for calculating the kinematics of crank mechanisms with trailed connecting rods] *Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarova*. 2016. No. 2 (36). P.107–117. (in Russ)
27. Vyubov D.N., Efimov S.I., Ivashchenko N.A. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Konstruirovaniye i raschet na prochnost' porshnevnykh i kombinirovannykh dvigateley* [Internal combustion engines. Design and strength calculation of reciprocating and combined engines] Mashinostroyeniye. Moscow. 1984. 383 p.

Расчет и конструирование

28. Maslov A.P., Levtsov M.V. [Kinematic and dynamic analysis of the crankshaft of a W-engine with trailer connecting rods] *Dvigatelistroyeniye*. 2019. No. 3 (277). P. 27–30. (in Russ)

29. Maslov A.P., Rozhdestvensky Yu.V., Levtsov M.V. [Graph-analytical analysis of the possibility of ensuring the same piston stroke of V and W-shaped engines with trailed connecting rods] *Dvigatelistroyeniye*. 2020. No. 2 (280) – P. 3–8. (in Russ)

Received 11 May 2023

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Анализ кинематической схемы поршневого W-образного двигателя с прицепными шатунами / А.П. Маслов, Ю.В. Рождественский, Е.А. Задорожная, М.В. Левцов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2023. – Т. 23, № 2. – С. 17–30. DOI: 10.14529/engin230202

FOR CITATION

Maslov A.P., Rozhdestvensky Y.V., Zadorozhnaya E.A., Levtsov M.V. Analysis of the kinematic scheme of an aircraft piston W-shaped engine with trailer connecting rods. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2023, vol. 23, no. 2, pp. 17–30. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin230202
