

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1244-1254

SIX STROKE ENGINES: OPERATING PROCEDURE AND SCHEMES OF CRANKSHAFTS

V. A. Zhukov¹, A. I. Yamanin², O. V. Melnik¹

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

The article is devoted to the perspective direction of development of internal combustion piston engines – realization of six-stroke working processes. The article presents an overview of possible options for the implementation of six-stroke cycles, known types of engines. The greatest interest is the six-stroke cycle with two working strokes of the piston, one of which is carried out under the pressure of the combustion products of fuel, and the second – under the pressure of steam formed as a result of water supply to the cylinder. This cycle is implemented in the Crower engine. It is shown that the six-stroke cycle has a number of advantages over the four-stroke cycle: its implementation improves the economic and environmental performance of the engine, reduces the temperature level of parts, which has a positive effect on resource performance. On the basis of published indicator diagrams of six-stroke engines, diagrams of the total torques of four-cylinder engines operating on four-stroke and six-stroke cycles are constructed. It was found that the implementation of a six-stroke working cycle with additional injection of water into the cylinder leads to some deterioration of the uniformity of the alternation of the working strokes and the uniformity of the torque. The use of special schemes of crankshafts can contribute to some improvement in these indicators. Recommendations on the use of crankshafts with cross-shaped schemes in six-stroke engines are given. The presented research technique can be used to select the preferred design of crankshafts for engines with different number of cylinders. Given the need for the preparation and storage of distilled water in the implementation of the six-stroke cycle, the conclusion is made about the possibility of using six-stroke engines as part of marine power plants. The necessity of further research of kinematics, dynamics and vibration activity of six-stroke engines is pointed out.

Keywords: six-stroke engine, economic and environmental indicators, the order of working strokes, the uniformity of angular velocity and torque, the scheme of crankshafts.

For citation:

Zhukov, Vladimir A., Alexander I. Yamanin, and Olesya V. Melnik. “Six storke engines: operating procedure and schemes of crankshafts.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1244–1254. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1244-1254.

УДК 621.432

ДВИГАТЕЛИ С ШЕСТИТАКТНЫМ РАБОЧИМ ЦИКЛОМ: ПОРЯДОК РАБОТЫ И СХЕМЫ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ

В. А. Жуков¹, А. И. Яманин², О. В. Мельник¹

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,
Ярославль, Российская Федерация

Статья посвящена перспективному направлению развития поршневых двигателей внутреннего сгорания — реализации шеститактных рабочих процессов. В статье представлен обзор возможных вариантов осуществления шеститактных циклов известных типов двигателей. Наибольший интерес представляет шеститактный цикл с двумя рабочими ходами поршня, один из которых осуществля-

ется под действием давления продуктов сгорания топлива, а второй — под действием давления пара, образующегося в результате подачи воды в цилиндр. Такой цикл реализуется в двигателе Кроуэра. Показано, что шеститактный цикл имеет ряд преимуществ перед четырехтактным: при его реализации улучшаются экономические и экологические показатели работы двигателя, снижается температурный уровень деталей, что положительно сказывается на ресурсных показателях. На основании опубликованных индикаторных диаграмм шеститактных двигателей построены диаграммы суммарных крутящих моментов четырехцилиндровых двигателей, работающих по четырехтактному и шеститактному циклам. При этом выявлено, что реализация шеститактного рабочего цикла при дополнительном впрыске воды в цилиндр приводит к некоторому ухудшению равномерности чередования рабочих ходов и равномерности крутящего момента. Применение особых схем коленчатых валов может способствовать улучшению этих показателей. Даны рекомендации по использованию в шеститактных двигателях коленчатых валов, имеющих крестообразные схемы. Представленная методика исследований может быть использована для выбора предпочтительной конструкции коленчатых валов для двигателей с различным числом цилиндров. Учитывая необходимость подготовки и хранения дистиллированной воды при реализации шеститактного цикла, можно сделать вывод о возможности использования шеститактных двигателей в составе судовых энергетических установок. Указано на необходимость продолжения исследования кинематики, динамики и виброактивности шеститактных двигателей.

Ключевые слова: шеститактный двигатель, экономические и экологические показатели, порядок рабочих ходов, равномерность угловой скорости и крутящего момента, схемы коленчатых валов.

Для цитирования:

Жуков В. А. Двигатели с шеститактным рабочим циклом: порядок работы и схемы коленчатых валов / В. А. Жуков, А. И. Яманин, О. В. Мельник // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1244–1254. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1244-1254.

Введение (Introduction)

Основной целью совершенствования двигателей внутреннего сгорания является улучшение экономических и экологических показателей при обеспечении требуемого уровня надежности. Для оценки возможности повышения эффективности тепловых двигателей используются энергетические и эксергетические методы [1]. Одним из известных способов улучшения эффективных показателей поршневых двигателей является реализация рабочего процесса с дополнительным впрыском воды в цилиндр. Это может осуществляться в течение традиционного четырехтактного цикла вместе с основным топливом для улучшения многих (прежде всего, мощностных) показателей двигателя. Такой способ работы в 1940–1950 гг. применялся на авиационных поршневых двигателях, выпускавшихся серийно фирмами *BMW*, *Deimler-Benz*, *Pratt&Whitney* и некоторыми другими предприятиями [2]. Положительный эффект от впрыскивания воды в цилиндры современных судовых двигателей описан в источнике [3]: показано, что для среднеоборотного дизеля *Wärtsilä L46/58* (6ЧРН 46/58) потенциально возможно увеличение индикаторного КПД до 0,55 и среднего индикаторного давления до 2,75 МПа, а также снижение индикаторного расхода топлива до 0,154 кг/(кВт·ч).

Один из первых патентов, в которых описан шеститактный двигатель, был получен Л. Н. Дуге в 1920 г. (см. пат. США № 1339176); в России заявки на патент «О двигателе внутреннего горения с вбрызгиванием нагретой воды и с конденсацией» были поданы в 1916 и 1923 гг. (см. пат. 2308, кл. 46а⁶, 3). Следует также отметить, что в книге американского автора Glenn D. Angle «Airplane Engine Encyclopedia» (Otterbein Press, Дейтон (Dayton), Огайо (Ohio), 1921, с. 437) историком авиации Ф. Джарреттом была дана следующая информация: «Двигатель компании *Ruston Proctor* является экспериментальным мотором воздушного охлаждения ротативного типа, который работает по шеститактному циклу и развивает мощность в 200 л. с.» (рис. 1). Во втором издании этой книги «Aerosphere, 1939» (Aircraft Publications, New York City, 1940) отмечалось, что дополнительная информация об этом двигателе отсутствует.

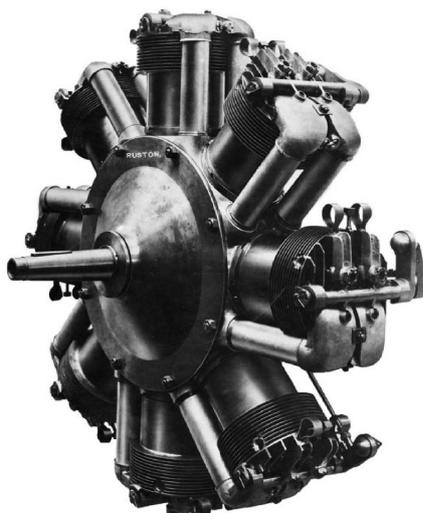


Рис. 1. Ruston Proctor: 300 л. с., шесть тактов
(фотография из справочника Aero Engine, выпущенного в 1918 г.)

В работе [4] приведен обзор известных шеститактных двигателей, которые разделены на две группы.

1-я группа. *Двигатели с двумя рабочими ходами в течение одного цикла, причем один рабочий ход совершается поршнем под действием продуктов сгорания, а второй — под действием пара или воздуха.* К таким двигателям относятся:

– двигатель Гриффина (Griffin Six Stroke Engine — *Griffin Simplex*), изобретенный в 1883 г. и производившийся под маркой «Килмарнок» (Kilmarnock);

– двигатель Баюласа (Bajulaz Six Stroke Engine), патент на который был получен в 1985 г., а в 1989 г. была создана усовершенствованная модель двигателя [5], [6];

– двигатель Кроуэра (Crower Six Stroke Engine), созданный в 2004 г.;

– двигатель Велозета (Velozeta Six Stroke Engine), особенностью которого является то, что для осуществления дополнительного рабочего хода используется воздух [7];

– двигатель Нийкадо (NIYKADO Six Stroke Engine), который создал Чанаил Клитас Анил (Chanayail Cleetus Anil) из Индии в период 2004–2012 гг., когда двигатель был запатентован.

2-я группа. *Двигатели, в которых в одном цилиндре расположены два поршня, движущихся навстречу друг другу.* Один из поршней движется с частотой, в два раза меньшей частоты другого поршня. Основной функцией второго поршня является замена клапанного механизма обычного четырехтактного двигателя. Таким образом, в течение каждого цикла осуществляется шесть ходов поршней. Использование второго поршня позволяет также увеличить степень сжатия. К таким двигателям относятся:

– двигатель Бир Хэд (Beare Head Six Stroke), изобретенный австралийцем М. Биром (M. Beare);

– двигатель с зарядным насосом (Charge Pump Engine), изобретенный Х. Котманном (H. Kottmann).

Существует и другой способ организации шеститактного рабочего процесса [8]: по окончании трех традиционных тактов (отличие заключается в том, что при этом процесс протекает при повышенных значениях избытка воздуха) производится сжатие отработавших газов (четвертый такт). Далее происходят впрыскивание топлива, сгорание, расширение (пятый такт) и традиционный выпуск отработавших газов (шестой такт). В источнике [8] рекомендованы значения соотношений «воздух – топливо» для первого и второго процессов сгорания, а также приведена индикаторная диаграмма, аналогичная приведенной в [9]. Термодинамика такого процесса описана А. Н. Соболенко [10]. Сходный с последним рабочий цикл описан А. Ф. Косяком в документе [11], где предусмотрена работа рядного четырехцилиндрового двигателя с рециркуляцией

части отработавших газов в соседние цилиндры, в которых вспышки следуют через 270 град. поворота вала. Дополнительная работа на пятом такте здесь совершается за счет импульса давления, сформированного поршнем соседнего цилиндра.

В настоящее время наибольшую известность получил шеститактный двигатель, изобретенный Б. Кроуэром (В. Crower). В двигателе Кроуэра первоначально реализуются четыре традиционных такта (наполнение, сжатие, расширение и выпуск). В течение выпуска (при движении поршня к верхней мертвой точке) в цилиндр впрыскивается вода, которая превращается в пар, совершающий при расширении (пятый такт) дополнительную работу. Шестым тактом является выпуск отработавшего пара. В связи с этим такие двигатели называют *шеститактными*. Термодинамический цикл шеститактного двигателя представлен на рис. 2.

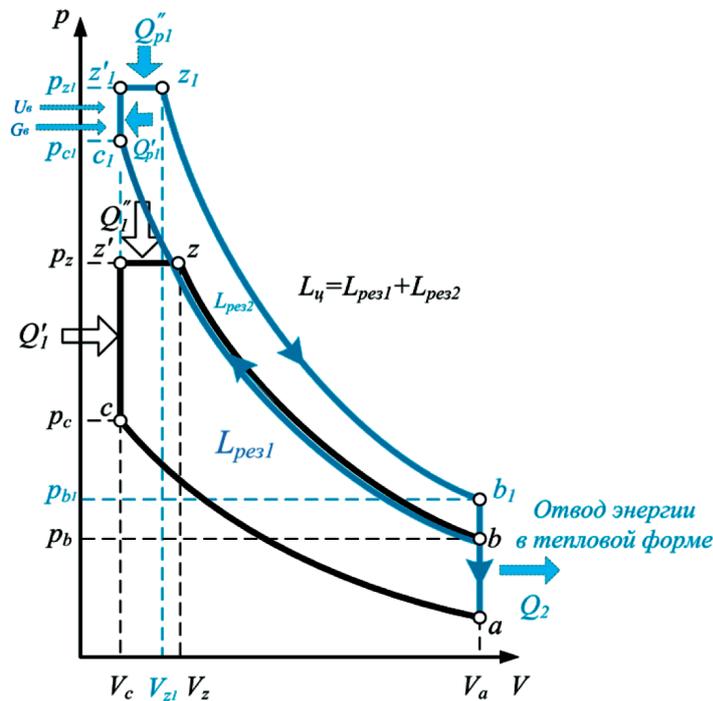


Рис. 2. Термодинамический цикл шеститактного двигателя:

V — объем надпоршневого пространства; V_a — объем в начале сжатия; V_c — объем в конце сжатия; V_z — объем в конце подвода теплоты в газовом цикле; V_{z1} — объем в конце подвода теплоты в паровом цикле; p — давление в цилиндре; p_c — давление в конце сжатия в газовом цикле; p_z — максимальное давление газового цикла; p_{c1} — давление в конце сжатия в паровом цикле; p_{z1} — максимальное давление парового цикла; Q_1, Q_1' — теплота, подведенная к рабочему телу в газовом цикле, соответственно, в изохорном и изобарном процессах; Q_{pl}, Q_{pl}' — теплота, подведенная к рабочему телу в паровом цикле, соответственно, в изохорном и изобарном процессах; G_b, U_b — соответственно масса и внутренняя энергия воды, поданной в цилиндр; $L_{pez1}, L_{pez2}, L_{ц}$ — работа, совершенная, соответственно, в газовом цикле, в паровом цикле, в шеститактном цикле

Длительность рабочего цикла составляет 1080 град. поворота коленчатого вала (рис. 3) [9].

Целесообразность реализации шеститактного цикла в современных двигателях наземного и водного транспорта рассматривается в работах [9]–[13], анализ патентно-лицензионной ситуации в области шеститактных двигателей дан А. А. Лефёровым [14]. В работе [15] исследован термодинамический цикл с парогазовым рабочим телом. Показано, что впрыск воды обеспечивает снижение тепловых потерь и температурных напряжений в деталях цилиндропоршневой группы и позволяет отказаться от дорогостоящих конструкционных материалов. Перспективность использования шеститактных двигателей подтверждается возможностью использования не только дизельного топлива и бензина, но и альтернативных видов топлива: водорода [16], [17] и водородно-кислородной смеси, состоящей из 2/3 водорода

и 1/3 кислорода [18], [19]. Использование альтернативных видов топлива и снижение максимальной температуры цикла в шеститактных двигателях обеспечивает существенное снижение выбросов с отработавшими газами: C_nH_m , CO , CO_2 , SO_x , NO_x и твердых частиц. Внутреннее охлаждение в шеститактном цикле позволяет на 30–50 % увеличить степень сжатия: до 14–16 для бензиновых двигателей и до 25–35 для дизелей, что обеспечивает повышение эффективных показателей работы двигателей. В четырехтактных двигателях отношение количества рабочих тактов к их общему числу составляет 1 : 4, а в шеститактных двигателях Кроуэра — 1 : 3. За счет такого изменения обеспечивается 30 % дополнительной полезной работы без увеличения расхода топлива. Таким образом, в работах [20]–[22], посвященных исследованию рабочих процессов шеститактных двигателей, доказана перспективность их использования с экономической и экологической точки зрения, а снижение температурного уровня деталей двигателя обеспечит увеличение их ресурса.

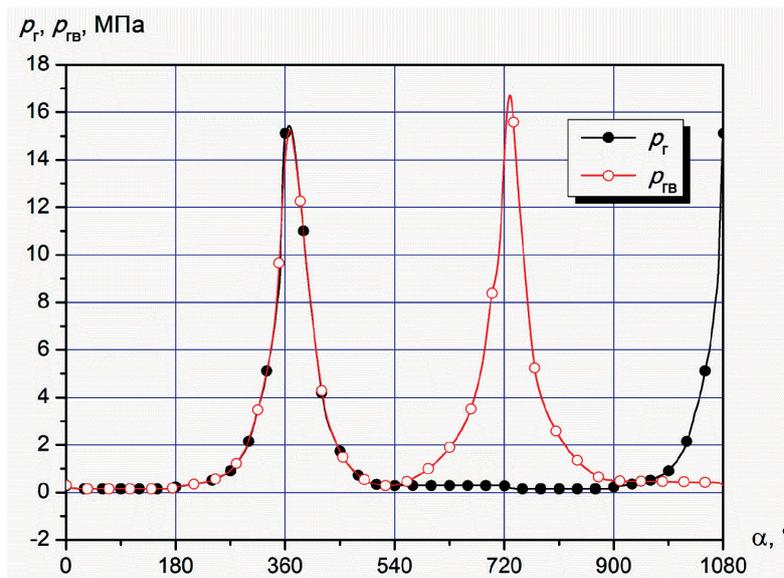


Рис. 3. Индикаторные диаграммы шеститактного ($p_{гв}$) и четырехтактного (p_r) циклов

При этом необходимо отметить, что указанная длительность шеститактного рабочего цикла (1080 град.) в многоцилиндровых двигателях с традиционными схемами коленчатых валов приводит к изменению равномерности чередования рабочих ходов и, как следствие, к изменению равномерности крутящего момента и хода. В известных работах на эту тему вопросы кинематики, динамики и виброактивности шеститактных двигателей не рассматривались, тогда как для четырехтактных двигателей, конструкция которых достаточно хорошо проработана, вопросы кинематики и динамики кривошипно-шатунного механизма и виброактивности двигателей продолжают оставаться предметом изучения и анализа [23]–[25]. В связи с этим и было предпринято данное исследование¹, которое следует рассматривать как первичное обсуждение проблемы.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Задача о порядках работы двигателя (последовательности чередования тактов в разных цилиндрах) решалась по методике [26] применительно к наиболее распространенным практически во всех видах транспорта схемам двигателей. Рассматривались рядный четырехцилиндровый и *V*-образные шести-, восьми-, десяти- и двенадцатицилиндровый двигатели, работающие по четырех- и шеститактному циклам. Для шеститактных двигателей были использованы оцифрованные индикаторные диаграммы, приведенные в источниках [8], [9]; способ организации шеститактного процесса (впрыск воды или повторное сжатие отработавших газов) здесь неважен. Первоначально

¹ Вопросы, связанных с реализацией шеститактного рабочего процесса, намного больше (в частности, анализ нагрузок на шейки и подшипники коленчатого вала, прочность звеньев КШМ, защита деталей от коррозии и т. д.). Здесь рассмотрены лишь некоторые из них.

предполагалось, что двигатели имеют традиционные для каждого из них схемы коленчатых валов (например, для рядного двигателя — четырехкривошипный плоский, для V-образного шестицилиндрового — трехкривошипный пространственный с равномерной заклиной кривошипов). Значения углов развала цилиндров V-образных двигателей приведены в таблице.

Относительные значения степени неравномерности крутящего момента двигателей, работающих по четырех- и шеститактному циклам

$i = 4$			$i = 6$		$i = 8$		$i = 10$		$i = 12$	
$\tau = 4$	$\tau = 6$	$\tau = 6a$	$\tau = 4$	$\tau = 6$						
1,0	4,42	3,60	1,00	1,22	1,0	3,84	1,0	1,91	1,0	3,68

Примечания: вариант $\tau = 6a$ соответствует четырехцилиндровому двигателю с крестообразным валом; углы развала цилиндров двигателей с $i = 6$ и $i = 8$ равны 90° ; с $i = 10$ и $i = 12$ — соответственно 72° и 60° .

В таблице приведены также значения степени неравномерности крутящего момента двигателей с наиболее распространенными значениями чисел цилиндров при реализации в них четырехтактного ($\tau = 4$) и шеститактного ($\tau = 6$) рабочих циклов. В каждом случае вычисленные значения для четырехтактного двигателя приняты за единицу.

Массовые характеристики звеньев были определены в результате твердотельного моделирования.

Результаты (Results)

Установлено, что в многоцилиндровом шеститактном двигателе изменяется порядок следования рабочих ходов (здесь имеются в виду ходы, соответствующие расширению как продуктов сгорания топлива, так и пара), в некоторые моменты времени в разных цилиндрах эти процессы происходят одновременно (рис. 4 и 5). В связи с этим в шеститактных двигателях увеличивается неравномерность суммарного крутящего момента. Замена плоского коленчатого вала в шеститактном двигателе на крестообразный делает крутящий момент более равномерным.

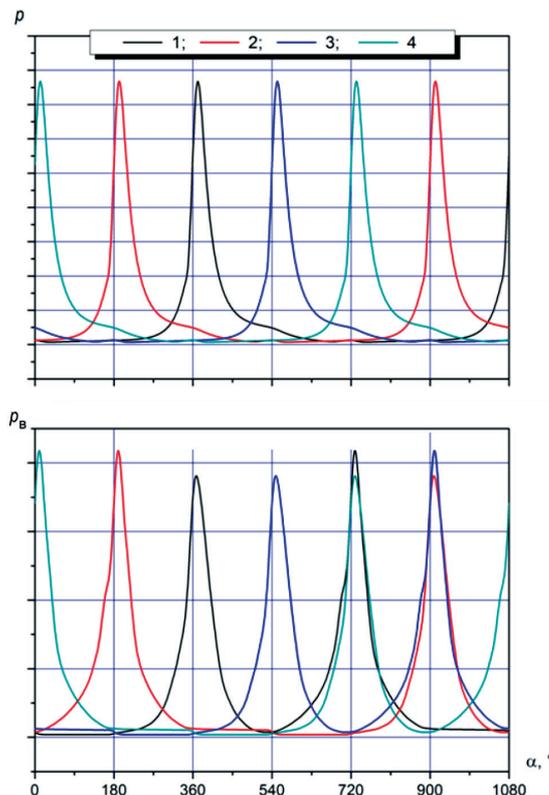


Рис. 4. Индикаторные диаграммы последовательно работающих цилиндров четырехцилиндровых рядных четырехтактного p и шеститактного p_v двигателей с плоским коленчатым валом
 Условные обозначения: 1, 2, ..., 4 — номера цилиндров

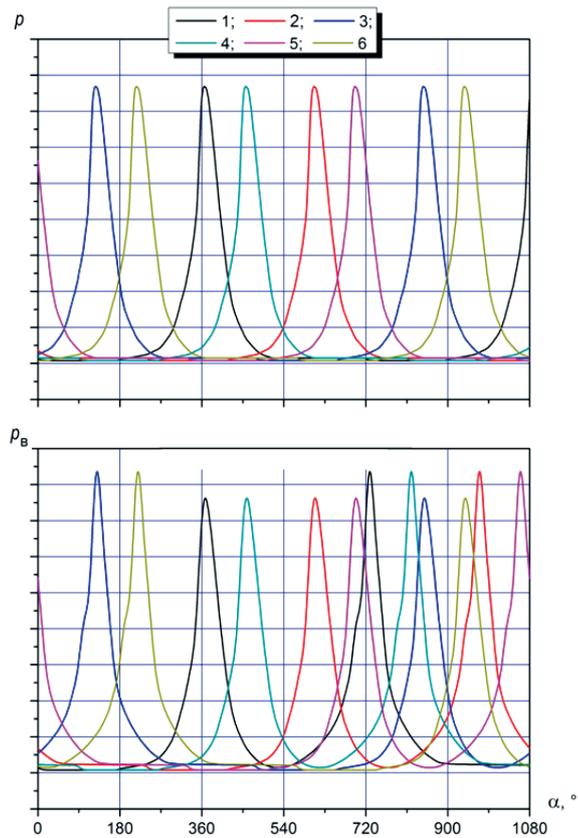


Рис. 5. Индикаторные диаграммы последовательно работающих цилиндров шестицилиндровых V-образных четырехтактного p и шеститактного p_b двигателей с трехкривошипным валом
Условные обозначения: 1, 2, ..., 6 — номера цилиндров

Обсуждение (Discussion)

Изменение неравномерности суммарного крутящего момента в шеститактном двигателе позволяет предположить, что изменение схемы заклинки кривошипов вала может способствовать улучшению равномерности крутящего момента. В связи с этим предпринята попытка расчета суммарного крутящего момента четырехцилиндрового двигателя с крестообразным коленчатым валом [8], применение которого известно в двухтактных двигателях (рис. 6 и 7). При этом в таких двигателях становятся неуравновешенными моменты сил инерции первого порядка, но это устраняется применением уравновешивающего механизма, схема которого также хорошо известна.

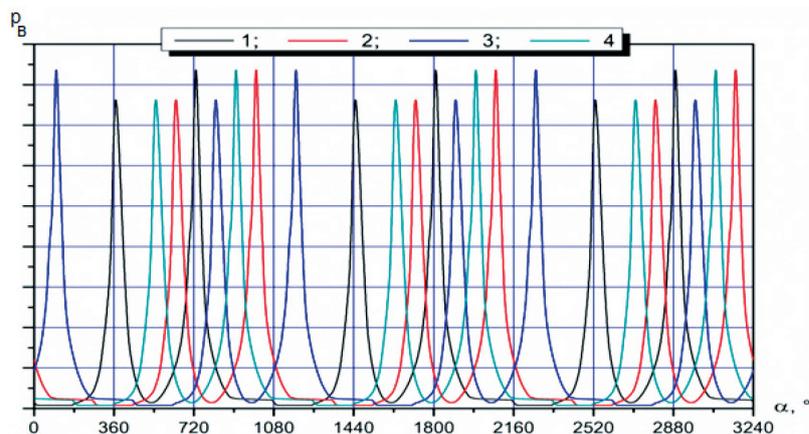


Рис. 6. Индикаторные диаграммы последовательно работающих цилиндров четырехцилиндрового рядного шеститактного двигателя с крестообразным коленчатым валом

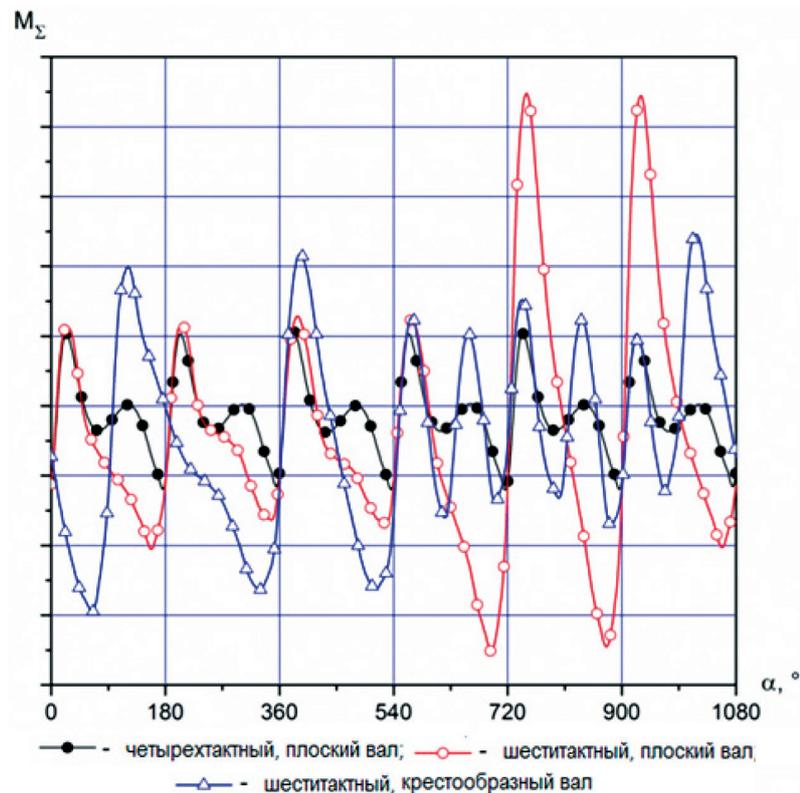


Рис. 7. Изменение суммарного крутящего момента четырехцилиндрового двигателя с плоским валом, работающего по четырех- и шеститактному циклам, и шеститактного с крестообразным валом

При работе двигателя по шеститактному циклу изменяется спектральный состав крутящего момента, развиваемого единичным цилиндром. В связи с этим для расчетов крутильных колебаний следует определять амплитуды его гармонических составляющих с порядками $1/3$, $2/3$, $3/3$, $4/3$ и т. д.

Заключение (Conclusion)

Наиболее перспективным следует считать использование шеститактных двигателей в составе судовых энергетических установок. В условиях машинного отделения морских и речных судов можно обеспечить подготовку и хранение дистиллированной воды, необходимой для подачи в цилиндры. При ограниченных объемах моторных отсеков наземных транспортных средств решение этой задачи вызывает значительные трудности.

Реализация в двигателе шеститактного рабочего цикла приводит к некоторому снижению равномерности хода и крутящего момента. Частичное устранение указанных обстоятельств потенциально возможно при использовании коленчатых валов с отличной от традиционных схем заклинки кривошипов, определение которых представляется вполне самостоятельной задачей. Описанная методика позволяет осуществлять выбор предпочтительных схем коленчатых валов для двигателей, реализующих шеститактный цикл при различном числе цилиндров.

Для корректного расчета на прочность деталей шеститактных двигателей необходимо продолжать исследования их кинематических, динамических и вибрационных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерофеев В. Л. Энергетический и эксергетический подходы к оценке повышения эффективности тепловых двигателей / В. Л. Ерофеев, В. А. Жуков, А. С. Пряхин // Вестник Государственного универси-

тета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1017–1026. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1017-1026.

2. *Кайдаш Н. Ф.* Впрыск воды в авиационные двигатели / Н. Ф. Кайдаш, К. К. Папок, Е. В. Любановский, Ю. П. Блонский. — М.: Ред.-изд. отдел Аэрофлота, 1946. — 96 с.

3. *Белоусов Е. В.* Влияние на рабочий процесс среднеоборотного судового дизеля путем впрыскивания воды в рабочий цилиндр / Е. В. Белоусов, М. С. Агеев, В. Н. Свиридов // Двигатели внутреннего сгорания. — 2010. — № 1. — С. 40–43.

4. *Mohandas G.* Review of Six Stroke Engine and Proposal for Alternative Fuels / G. Mohandas, V. Desai-Patil // SSRG International Journal of Mechanical Engineering (SSRG-IJME). — 2015. — Vol. 2. — Is. 10. — Pp. 19–24.

5. Pat. 4513568 USA, IPC F02B 75/021 Method for the transformation of thermal energy into mechanical energy by means of a combustion engine as well as this new engine / Roger Bajulaz; USA assignee. — № US06442799; app. 18.11.1982; pub. 30.04.1985. — 9 p.

6. Pat. 4809511 USA, IPC F02G 1/02 Internal Combustion Engine / Roger Bajulaz; USA assignee. — № US07059218; app. 08.06.1987; pub. 07.03.1989. — 12 p.

7. *Pande P. H.* Velozeta Six Stroke Engine / P. H. Pande // International Journal of Research in Advent Technology. — 2015. — Special Issue. — Pp. 215–219.

8. Application US 20140157758 A1, IPC F01N 3/2066, F01N 3/103 After-treatment system and method for six-stroke combustion cycle / Ronald Silver Scott, B. Fiveland, D. Ryan Williams; Caterpillar Inc. assignee. App. 12.06.2014. — 13 p.

9. *Быстров О. И.* Повышение экономических и экологических показателей дизеля путем реализации комбинированного шеститактного цикла: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / О. И. Быстров. — Челябинск: Южно-Уральский гос. ун-т, 2008. — 16 с.

10. *Соболенко А. Н.* Термодинамический КПД обобщенного теоретического цикла шеститактного ДВС / А. Н. Соболенко // Вестник Тихоокеанского государственного университета. — 2015. — № 1 (36). — С. 141–150.

11. А. с. SU 1617169 A1, МПК F01B 75/02. Способ работы шеститактного двигателя внутреннего сгорания / А. Ф. Косяк, В. И. Васильев, В. Н. Осипов. — № 4380121/25-06; Заявлено 18.02.88; Опубл. 30.12.90, Бюл. № 48.

12. *Романов С. В.* Повышение топливной экономичности двигателей сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов путем применения водной инжекции: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / С. В. Романов. — Троицк: Южно-Уральский гос. аграрн. ун-т, 2017. — 207 с.

13. *Karmalkar C.* Analyzing the implementation of six stroke engine in a Hybrid Car / C. Karmalkar, V. Raut // International Journal of Mechanical Engineering and Applications. — 2014. — Vol. 2. — No. 1. — Pp. 1–4. DOI: 10.11648/j.ijmea.20140201.11.

14. *Лефёров А. А.* Актуальность и проблемы совершенствования цикла ДВС применением непосредственного впрыска воды / А. А. Лефёров, Н. Д. Куприянов // Труды МАИ. — 2010. — № 39. — С. 10.

15. *Юша В. Л.* Анализ эффективности идеального термодинамического цикла комбинированного двигателя внутреннего сгорания с парогазовым рабочим телом / В. Л. Юша, Г. И. Чернов // Омский научный вестник. — 2009. — № 3 (83). — С. 154–158.

16. *Prasath B. R.* Hydrogen operated internal combustion engines—a new generation fuel / B. R. Prasath, E. Leelakrishnan, N. Lokesh, H. Suriyan, E. Guru Prakash, K. O. Mustaq Ahmed // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. — 2012. — Vol. 2. — Is. 4. — Pp. 52–57.

17. *Deepak Kumar.* Hydrogen Fuel in 6-Stroke IC Engines and Reduction of Noxemission Using Hollow Fiber Membrane Module / Deepak Kumar, N. Gowtham // International Journal of Mechanical and Production Engineering (IJMPE). — 2015. — Vol. 3. — Is. 3. — Pp. 58–63.

18. *Bhardwaj S.* Effect of Brown Gas On the Performance of a Four Stroke Gasoline Engine / S. Bhardwaj, A. S. Verma, S. K. Sharma // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. — 2014. — Vol. 4. — Is. 1. — Pp. 300–308.

19. *Leelakrishnan E.* Performance and Emission Characteristics of Brown's Gas Enriched Air in Spark Ignition Engine / E. Leelakrishnan, N. Lokesh, H. Suriyan // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. — 2013. — Vol. 2. — Is. 2. — Pp. 393–404.

20. *Alkhaniya A.* Concept of Six Stroke Engine / A. Alkhaniya, A. Kotiyal // International Journal of Mechanical and Industrial Technology. — 2014. — Vol. 2. — Is. 2. — Pp. 1–4.

21. Makheeja D. A Review: Six Stroke Internal Combustion Engine / D. Makheeja // Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE). — 2015. — Vol. 12. — Pp. 7–11.
22. Kandari S. Six Stroke Engine / Kandari, I. Gupta // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). — 2013. — Vol. 2. — Is. 10. — Pp. 884–889.
23. Яманин А. И. Численное моделирование виброактивности поршневых двигателей с продолженным расширением рабочего тела / А. И. Яманин, В. А. Жуков // Двигатели внутреннего сгорания. — 2014. — № 1. — С. 27–31.
24. Жуков В. А. Анализ алгоритмов расчета кинематики кривошипно-шатунных механизмов с прицепными шатунами / В. А. Жуков, А. И. Яманин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 109–118. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-109-118.
25. Яманин А. И. Силовой анализ поршневого двигателя с использованием динамических моделей кривошипно-шатунного механизма / А. И. Яманин, В. А. Жуков, С. О. Барышников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 191–200. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-191-200.
26. Яманин А. И. Динамические расчеты поршневых двигателей в среде Microsoft Office Excel / А. И. Яманин. — Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2014. — 111 с.

REFERENCES

1. Erofeev, Valentin L., Vladimir A. Zhukov, and Alexandr S. Pryachin. “Energy and exergy approaches to assessment enhance the efficiency of heat engines”. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1017–1026. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1017-1026.
2. Kaidash, N. F., K. K. Papok, E. V. Lyubanovskii, and Yu. P. Blonskii. *Vprysk vody v aviatsionnye dvigateli*. M.: Red.-izd. otdel Aeroflota, 1946.
3. Belousov, E. V., M. S. Ageev, and V. I. Sviridov. “The influence on working process of the average speed ship engine by water injection to the working cylinder.” *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* 1 (2010): 40–43.
4. Mohandas, Gokul, and Virendra Desai-Patil. “Review of Six Stroke Engine and Proposal for Alternative Fuels.” *SSRG International Journal of Mechanical Engineering (SSRG-IJME)* 2.10 (2015): 19–24.
5. Bajulaz, Roger. US 4513568 B, IPC F 02 B 75/021. Method for the transformation of thermal energy into mechanical energy by means of a combustion engine as well as this new engine. USA assignee. Publ. 30 April 1985.
6. Bajulaz, Roger. US 4809511 B, IPC F02G 1/02. Internal Combustion Engine. USA assignee. Publ. 7 March 1989.
7. Pande, Prashant Haridas. “Velozeta Six Stroke Engine.” *International Journal of Research in Advent Technology* Special Issue (2015): 215–219.
8. Scott, Ronald Silver, B. Fiveland, and D. Ryan Williams. US 20140157758 A1, IPC F01N 3/2066, F01N 3/103. After-treatment system and method for six-stroke combustion cycle. USA assignee. App. 12.06.2014.
9. Bystrov, O. I. Povyshenie ekonomicheskikh i ekologicheskikh pokazatelei dizelya putem realizatsii kombinirovannogo shestitaktnogo tsikla. Abstract of PhD diss. Chelyabinsk.: Yuzhn.-Ur. gos. un-t, 2008.
10. Sobolenko, A. N. “Thermodynamic Efficiency of Generalized Theoretical Six-Cycle Engine.” *Bulletin of PNU* 1(36) (2015): 141–150.
11. Certificate of authorship SU 1617169 A1, IPC F01V 75/02. Sposob raboty shestitaktnogo dvigatelya vnutrennego sgoraniya.
12. Romanov, S. V. Povyshenie toplivnoi ekonomichnosti dvigatelei sel'skokhozyaistvennykh mashinno-traktornykh agregatov putem primeneniya vodnoi inzhektsii. PhD diss. Troitsk: Yuzhn.-Ur. gos. agrarn. un-t, 2017.
13. Karmalkar, Chinmayee, and Vivek Raut. “Analyzing the implementation of six stroke engine in a Hybrid Car.” *International Journal of Mechanical Engineering and Applications* 2.1 (2014): 1–4. DOI: 10.11648/j.ijmea.20140201.11.
14. Leferov, A. A., and N. D. Kupriyanov. “Aktual'nost' i problemy sovershenstvovaniya tsikla DVS primeneniem neposredstvennogo vpryska vody.” *Trudy MAI* 39 (2010): 10.
15. Yusha, V. L., and G. I. Chemov. “The analysis of internal combustion engine with vapor and gas working mixture for ideal thermodynamics cycle efficiency.” *Omsk Scientific Bulletin* 3(83) (2009): 154–158.
16. Prasath, B. Rajendra, E. Leelakrishnan, N. Lokesh, H. Suriyan, E. Guru Prakash, K. Omur Mustaq Ahmed. “Hydrogen operated internal combustion engines—a new generation fuel.” *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 2.4 (2012): 52–57.

17. Deepak Kumar, and N. Gowtham. "Hydrogen Fuel in 6-Stroke IC Engines and Reduction of Noxemission Using Hollow Fiber Membrane Module." *International Journal of Mechanical and Production Engineering (IJMPE)* 3.3 (2015): 58–63.

18. Bhardwaj, Shrikant, Ajay Singh Verma, and Subodh Kumar Sharma. "Effect of Brown gas on the performance of a four stroke gasoline engine." *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 4.1 (2014): 300–308.

19. Leelakrishnan, E., N. Lokesh, and H. Suriyan. "Performance and emission characteristics of Brown's gas enriched air in spark ignition engine." *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 2.2 (2013): 393–404.

20. Alkhaniya, Akash, and Aakash Kotiyal. "Concept of Six Stroke Engine." *International Journal of Mechanical and Industrial Technology* 2.2 (2014): 1–4.

21. Makheeja, D. "A Review: Six Stroke Internal Combustion Engine." *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* 12 (2015): 7–11.

22. Kandari, S., and I. Gupta. "Six Stroke Engine." *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* 2.10 (2013): 884–889.

23. Yamanin, A. I., and V. A. Zhukov. "Numerical simulation of vibration of piston engines with prolonged expansion of working medium." *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* 1 (2014): 27–31.

24. Zhukov, Vladimir Anatolevich, and Alexander Ivanovich Yamanin. "The analysis of algorithms for calculation of kinematics of crankshaft-rod mechanism with the coupled connecting-rods." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 109–118. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-109-118.

25. Yamanin, Alexander I., Vladimir A. Zhukov, and Sergey O. Baryshnikov. "Force analysis of reciprocating engine using dynamic models of crank mechanism." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 191–200. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-191-200.

26. Yamanin, A. I. *Dinamicheskie raschety porshnevnykh dvigatelei v srede Microsoft Office Excel*. Yaroslavl: Izd-vo YaGTU, 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жуков Владимир Анатольевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: zhukovva@gumrf.ru, va_zhukov@rambler.ru

Яманин Александр Иванович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный
технический университет»
150023, Российская Федерация, г. Ярославль,
Московский проспект, 88
e-mail: yamaninail@ystu.ru, a_yam@mail.ru

Мельник Олеся Владимировна —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: olvmelnik@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTORS

Zhukov, Vladimir A. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: zhukovva@gumrf.ru, va_zhukov@rambler.ru

Yamanin, Alexander I. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Yaroslavl State Technical University
88 Moskovsky Av., Yaroslavl, 150023,
Russian Federation
e-mail: yamaninail@ystu.ru,
a_yam@mail.ru

Melnik, Olesya V. —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: olvmelnik@gmail.com

Статья поступила в редакцию 12 декабря 2018 г.
Received: December 12, 2018.