

возможность создать высокоэффективную гидropередачу с автоматической регуляцией силы тяги и скорости в зависимости от условий работы энергетического средства.

## FREE-PISTON ENGINE-AND-HYDRAULIC PUMP

A.F.Golovchuk

There is currently ever-growing range of products with extensive adoption of hydraulics in all engineering industries. Government programs concerning the development of more cost-effective and less metal-intensive machines enable and necessitate creation of a new type of mobile vehicles with the continuously variable hydraulic transmission. We suggested the use of engine of the free-piston type, since it is more cost-effective and less metal-intensive as compared with the internal combustion engines of crank type. The use of free-piston engines-and-hydraulic pumps as power-transmission plants of power vehicles (diesel locomotives, combine harvester, tractors, cars and other mobile and stationary power installations) with the continuously variable transmissions allows cost effectiveness improvement and reduction in metal consumption of these vehicles. For the time being, free-piston engines are only used as gas generators and diesel-compressors, and the hydrostatic transmission is currently combined with the conventional heat engine which driven the hydraulic pumps. The use of the free-piston engine enables creation of high-efficiency hydraulic transmission with the traction power and speed self-adjustment in accordance with the power vehicle operation conditions.

УДК 621.43: 62-66: 62-62

*Е.В. Белоусов, В.В. Чернявский*

## ЦИКЛ МИЛЛЕРА И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ В СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

*Рассмотрены основные подходы, связанные с организацией рабочих процессов современных судовых двигателей с самовоспламенением от сжатия по циклу Миллера. Проанализированы основные отличия между циклами Актинсона и Миллера. Рассмотрены известные способы реализации рабочих процессов по циклу Миллера с «укороченным сжатием» и «укороченным впуском». Проанализированы основные преимущества и недостатки каждого способа реализации цикла, и для каждого определена область его применения. На основании приведенных данных выработан ряд рекомендаций по уточнению специальной терминологии.*

### Введение

Последнее время в иностранной технической литературе по двигателям внутреннего сгорания, наряду с традиционными циклами (Отто, Дизеля, Тринклера-Саботе) широко используется понятие цикла Миллера. Сегодня многие производители четырехтактных средне- и высокооборотных судовых дизелей дистанцируют их как двигатели, работающие по циклу Миллера. В связи с этим возникла необходимость более четко определиться с понятиями и особенностями организации рабочего процесса по данному циклу.

### Анализ состояния проблемы

В отечественной учебной и научной литературе определение и описание особенностей данного цикла отсутствует. Анализ научных статей, посвященных рабочим процессам показал, что отсутствие четкого понимания особенностей протекания рабочих процессов по циклу Миллера зачастую приводит к путанице и подмене понятий.

**Целью данной статьи** является систематизация имеющихся сведений о цикле Миллера и перспективах его использования в судовых ДВС.

### Результаты исследования

Цикл Миллера был предложен американским инженером датского происхождения Ральфом

Миллером (Ralph Miller) в 1947 году. В основе цикла лежала идея, высказанная еще в 1882 году британским инженером Джеймсом Аткинсоном (James Atkinson). Суть идеи сводилась к следующему: повысить эффективность поршневого двигателя можно за счет сокращения хода сжатия и увеличения хода расширения рабочего тела. В результате уменьшатся затраты на сжатие и увеличится полезная работа, совершаемая газами в рабочем цилиндре. К тому же, применительно к бензиновым двигателям это давало возможность использовать топлива с относительно невысокой детонационной стойкостью.

В своих патентах Актинсон предлагает реализовать данный принцип за счет достаточно сложных механизмов привода рабочего поршня. Сначала была разработана кинематическая схема с двумя поршнями, двигающимися навстречу друг другу в одном цилиндре [1], затем схема привода поршня одноцилиндрового двигателя с кривошипно-кулисным механизмом. Последняя конструкция, схема которой заимствована из американского патента № 367496 [2], представлена на рис. 1а. Было построено несколько вариантов двигателя Актинсона (рис. 1б), однако увеличение эффективности в значительной степени нивелировалось ростом ме-

ханических потерь и сложностью механизма привода, а снижение наполнения цилиндра приводило к потере мощности по сравнению с аналогичными двигателями других конструкций. По этой причине широкого распространения двигатели Актинсона не получили. Цикл двигателя Актинсона представлен на рис. 2а, однако все известные патенты автора относились к определенным конструкциям, термодинамические циклы в них не рассматривались.

В 1947 году Ральф Миллер возвращается к идее использования сокращенного сжатия и продолженного расширения, однако предлагает реализовать данный принцип не за счет кинематики привода поршня, а путем подбора фаз газораспределения для двигателя с обычным кривошипно-

шатунным механизмом.

Подобная организация рабочего процесса применима как к двигателям с самовоспламенением от сжатия, так и к двигателям с принудительным поджогом. При этом теоретический цикл двигателя Миллера с искровым зажиганием полностью соответствует циклу Актинсона (рис. 2а). Теоретический цикл Миллера применительно к дизельным двигателям представлен на рис. 2б.

Понимая, что сокращение хода сжатия в рабочем цилиндре приведет к потере мощности двигателя, Миллер изначально связывает свои разработки с наддувными двигателями, в которых данные потери могут быть компенсированы за счет предварительного сжатия заряда в компрессоре [3].

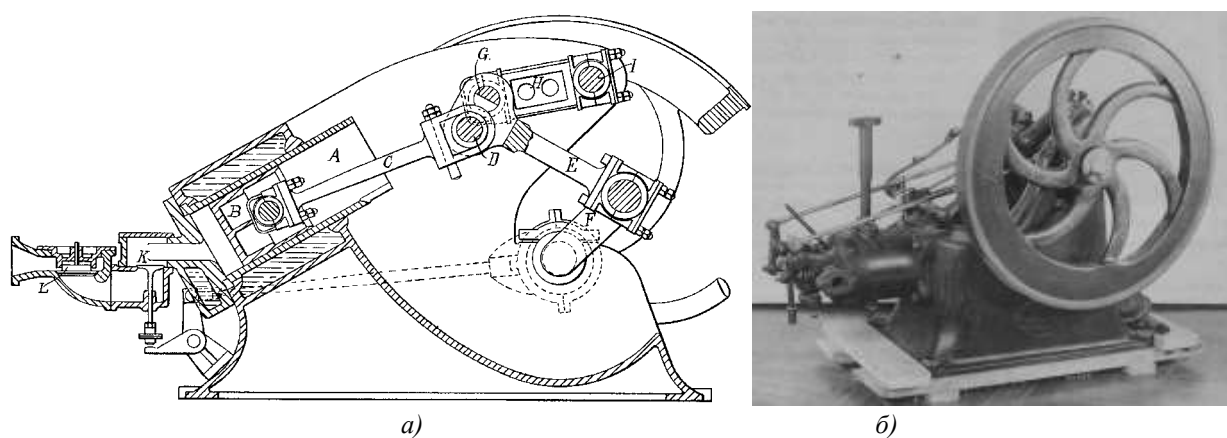


Рис. 1. Схема двигателя Актинсона (заимствовано из американского патента № 367496) (а); двигатель Актинсона (б)

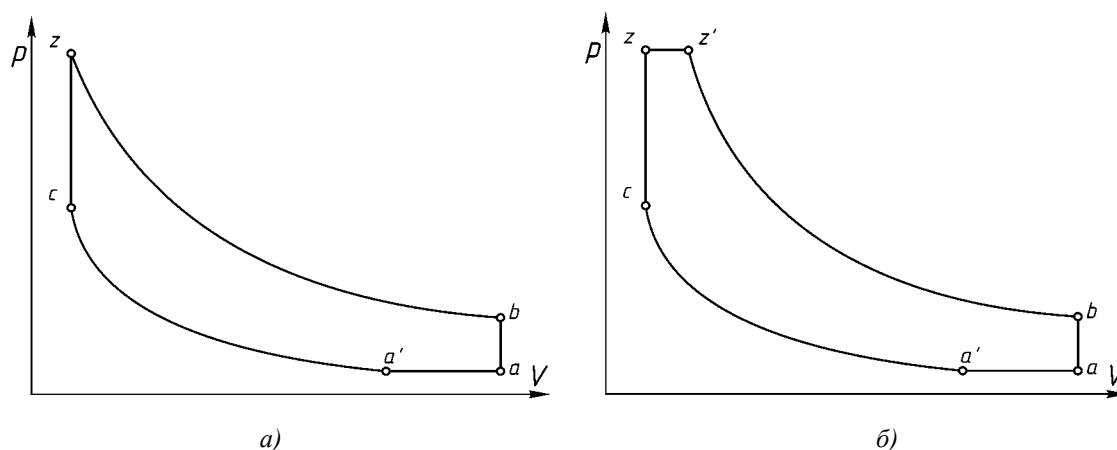


Рис. 2. Цикл Актинсона-Миллера для двигателя с искровым зажиганием (а) и цикл Миллера для двигателя с самовоспламенением (б)

В своем патенте Миллер рассматривает два варианта организации указанного рабочего процесса со слишком ранним или слишком поздним закрытием впускного клапана [4, 6]. На рис. 3 пока-

зан фрагмент иллюстрации к его американскому патенту № 2670595 с диаграммой газообмена двигателя, работающего по предлагаемому циклу. В первом случае, названном «укороченным сжати-

ем», при движении поршня от НМТ и до момента закрытия впускного клапана некоторое количество воздуха вытесняется назад во впускной коллектор, и только оставшаяся часть заряда подвергается сжатию (рис. 4 а) [4, 5].

Во втором случае, названном «укороченным впуском», клапан закрывается еще до прихода поршня в НМТ (рис. 4 б). От момента закрытия клапана и до НМТ происходит предварительное расширение заряда, и только потом следует его сжатие.

Несмотря на разность подходов, оба варианта ведут к снижению фактической степени сжатия по отношению к геометрической. В теоретическом цикле Миллера (рис. 4) сжатие начинается не в точке 1, а в точке  $a'$ . При этом степень расширения остается неизменной, в результате чего эффективность рабочего процесса возрастает.

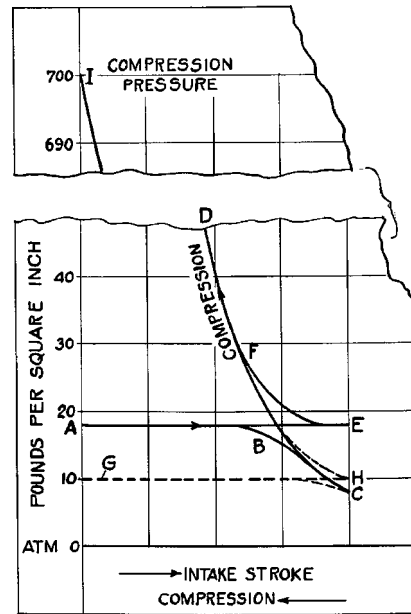


Рис. 3. Фрагмент иллюстрации к американскому патенту № 2670595

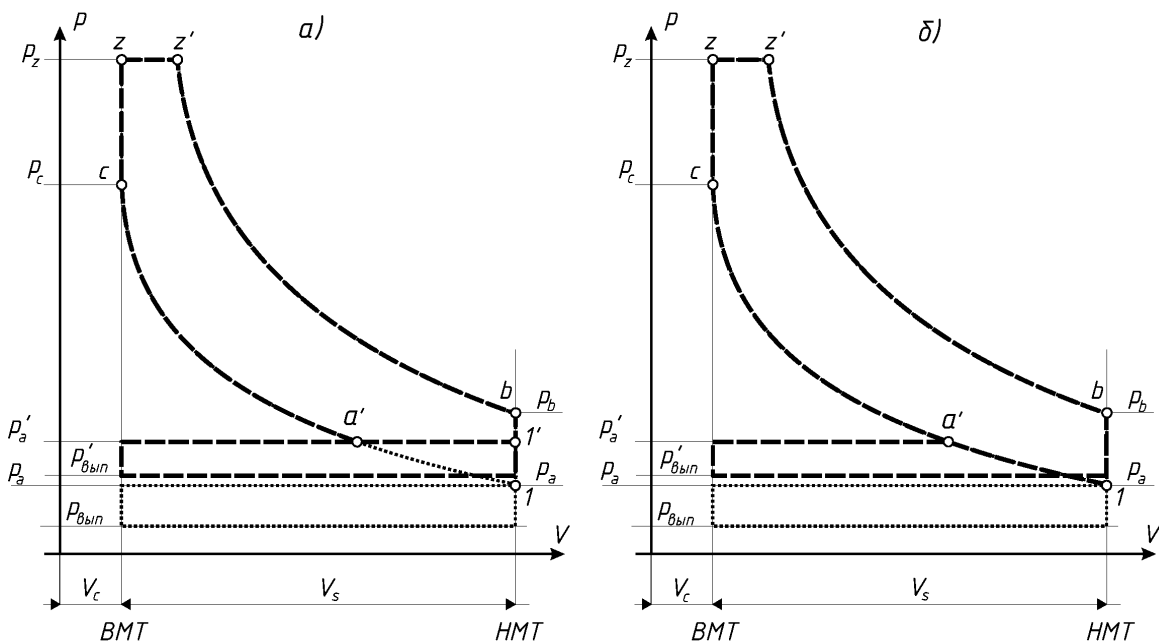


Рис. 4. Варианты реализации цикла Миллера для двигателей с самовоспламенением от сжатия: а – с укороченным сжатием; б – с укороченным впуском. — — — цикл Миллера; ..... – базовый цикл

Компенсировать потерю мощности при переходе на цикл Миллера возможно повысив начальное давление воздуха применением высокого наддува. На рис. 5 представлен базовый цикл двигателя с наложенными на него вариантами циклов Миллера. Из рисунка видно, что для получения параметров цикла Миллера, идентичных с базовым циклом, давление на входе в цилиндр должно быть повышено с  $p_a$  до  $p'_a$ .

Как уже отмечалось, единственное отличие между теоретическими циклами с укороченным сжатием и укороченным расширением является участок между началом сжатия  $a'$  и НМТ.

При укороченном впуске, на участке цикла  $a'-1-a'$ , при закрытых клапанах происходит предварительное расширение рабочего тела (участок  $a'-1$ ), после чего следует его предварительное сжатие (участок  $1-a'$ ). Таким образом, для данного способа

реализации цикла Миллера процесс сжатия состоит из двух этапов: предварительного и основного. Под моментом начала основного сжатия следует понимать момент, когда давление в рабочем цилиндре превысит давление во впускном ресивере [6, 7].

В случае укороченного сжатия, на участке цикла  $a'-1'-a'$  происходит процесс впуска заряда в цилиндр (участок  $a'-1'$ ), а затем через открытые клапана, под действием движущегося поршня, часть заряда вытесняется назад во впускной ресивер (участок  $1'-a'$ ). В данном случае, теоретический момент начала сжатия совпадает с закрытием впускных клапанов.

В теоретических циклах оба участка характеризуются нулевой работой, а все другие участки цикла идентичны [8].

Помимо повышения эффективности, использование цикла Миллера позволяет снизить уровень тепловой напряженности рабочего процесса. Особенно это актуально для судовых дизелей, которые имеют достаточно высокий уровень форсирования.

Уменьшение ключевых температур цикла объясняется тем, что для реализации рабочего процесса с таким же максимальным давлением, как и в базовом цикле, воздух в двигатель необходимо подать с большим начальным давлением. Это достигается путем использования более высоких давлений наддува. Учитывая, что после турбокомпрессора воздух подвергается промежуточному охлаждению, в цилиндры двигателя он поступает с более низкой температурой, чем та, которая при этом

же давлению соответствует процессу сжатия в точке  $a'$  базового цикла. В результате значения температур во всех ключевых точках цикла уменьшаются, что хорошо видно из диаграммы в  $T-S$  координатах, показанной на рис. 5а.

В теоретическом цикле с укороченным впуском рабочее тело предварительно расширяется, и поэтому его температура на момент начала предварительного сжатия оказывается более низкой. В ходе последующего сжатия, температура заряда возрастает и к моменту начала основного сжатия становится равной температуре воздуха в надвучном ресивере. Поскольку часть хода к этому моменту поршнем уже пройдена, температура к концу сжатия, при прочих равных условиях, будет меньше чем в базовом цикле. Соответственно, понижаются значения температур и в остальных ключевых точках цикла. Последнее хорошо видно из диаграммы рабочего процесса в  $T-S$  координатах, представленной на рис. 5а.

Аналогичное снижение температур во всех ключевых точках отмечается в цикле Миллера с укороченным сжатием. В этом случае температура заряда в цилиндре остается постоянной, равной температуре воздуха во впускном ресивере на всем участке хода поршня от НМТ и до закрытия впускного клапана (участок  $a'-1'$ ). Сжатие, как и в первом случае, начинается в точке  $a'$  с теми же начальными параметрами состояния рабочего тела, что и в случае процесса с укороченным впуском [7].

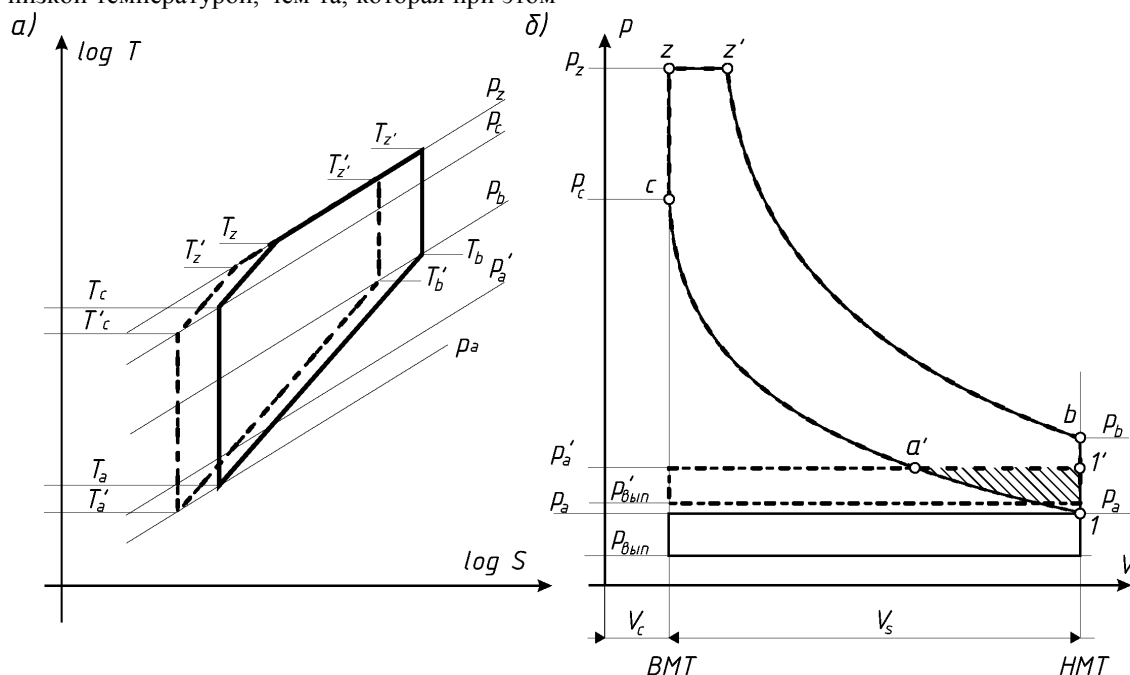


Рис. 5. Совмещенные диаграммы рабочих процессов базового двигателя и организованных по циклу Миллера с укороченными сжатием и впуском в  $T-S$ -координатах (а) и в  $pV$ -координатах (б): — — — базовый цикл; - - - с укороченным сжатием; . . . с укороченным впуском

На рис. 5б показаны совмещенные диаграммы рабочих процессов организованных по циклу Миллера и рабочий процесс базового двигателя в  $pV$ -координатах, аналогичные тем, что показаны на рис. 5а в  $TS$ -координатах. Из рисунков видно, что при тех же давлениях в ключевых точках цикла действуют более низкие температуры, что указывает на снижение тепловой напряженности рабочего процесса. Безусловно, снижение ключевых температур приводит и к снижению интенсивности образования оксидов азота, что делает двигатели, работающие по циклу Миллера, более экологичными.

Потеря части полезной работы на участке газообмена, получившая название «потери Миллера» (заштрихованная область на рис. 5б), может достигать до 0,5%. В реальных циклах «потери Миллера» компенсируются за счет более высокого давления наддува и снижения тепловых потерь, связанных с уменьшением общей теплонапряженности рабочего процесса.

При сохранении давления наддува на уровне, характерном для базового двигателя, переход на цикл Миллера приводит к снижению давлений в ключевых точках цикла, в результате чего уменьшается механическая напряженность, что, в свою очередь, приводит к увеличению механического КПД двигателя.

Как уже было отмечено, в теоретическом цикле позднее или раннее закрытие впускных клапанов приводит к одинаковому результату. В реальных циклах, имеются некоторые отличия:

- при укороченном впуске клапана начинают закрываться очень рано; поэтому разность между давлением в цилиндре и давлением наддува приводит к большим потерям на дросселирование, что, в свою очередь, способствует дополнительному охлаждению заряда. Кроме того, предварительное расширение, предшествующее сжатию, приводит к понижению температуры рабочего тела непосредственно в рабочем цилиндре, поэтому, цикл Миллера с укороченным впуском еще называют циклом с внутренним охлаждением заряда;

- в случае позднего закрытия впускного клапана и выпуска части воздушного заряда так же присутствуют некоторые потери на дросселирование, что приводит к некоторому росту давления на участке хода выталкивания заряда.

При укороченном сжатии необходимо также учитывать теплопередачу: воздушный заряд, вытесненный поршнем из цилиндра, был уже подогрет и это тепло аккумулируется во впускном канале, пока впускной клапан не открывается снова в следующем цикле. Это частично понижает теоре-

тическое охлаждение заряда цилиндра по сравнению с ранним закрытием.

Таким образом, использование укороченного сжатия позволяет более эффективно снижать максимальное давление и температуру цикла. Особенно эффективно использование укороченного сжатия в среднеоборотных двигателях, работающих при постоянной частоте вращения. Относительно небольшие скорости вращения СОД позволяют обеспечить оптимальный закон движения впускного клапана, позволяющий получить максимальное проходное сечение клапанной щели. Кроме того, четырехтактные двигатели обладают значительным резервом энергии отработавших газов, что при наличии высокоэффективных турбокомпрессоров позволяет значительно повысить давления наддува для компенсации «потерь Миллера».

При увеличении частоты вращения, сокращение времени на открытие и закрытие клапанов накладывает ограничения, связанные с механическими нагрузками в приводе клапанов. Зачастую это приводит к необходимости уменьшения их хода, что увеличивает потери на дросселирование. Кроме того, при снижении частоты вращения, и, как следствие, давления наддува, слишком раннее закрытие впускного клапана приводит к значительному ухудшению наполнения цилиндра.

Поэтому для высокооборотных двигателей (в том числе и с искровым зажиганием) и двигателей, работающих в широком диапазоне нагрузочно-скоростных режимов, предпочтение отдают циклу Миллера с укороченным сжатием. Для двигателей, работающих при постоянной частоте вращения на режимах, близких к номинальной мощности, преимущественно используют цикл Миллера с укороченным впуском.

### Выводы

Исходя из сказанного выше, можно сделать ряд выводов:

1. Если рассматривать идеальный термодинамический цикл, то для двигателей Актинсона и Миллера он будет одинаков. Однако, несмотря на общие подходы, методы реализации разности между ходами сжатия и расширения в обоих случаях принципиально отличаются. Способ, предложенный Миллером, скорее нужно рассматривать применительно к реальным процессам как способ организации газообмена в двигателе. Однако в связи с тем, что в мировой практике уже устоялась идентификация двигателей с укороченным сжатием как двигателей работающих по циклу Миллера, целесообразно данную классификацию сохранить в отечественной научной литературе, отдавая должное Джеймсу Аткинсону как автору основной идеи.

2. Способ организации рабочего процесса, предложенный Миллером, может быть реализован как для двигателей с искровым зажиганием, так и для дизелей. В этой связи вряд ли стоит его рассматривать как самостоятельный цикл, а скорее как разновидность уже существующих термодинамических циклов. В этой связи некоторые западные авторы, для более точной идентификации, используют термины Отто-Миллер, Дизель-Миллер и т.д.

Существует два принципиально отличных подхода к организации рабочего процесса по циклу Миллера с «укороченным сжатием» и с «укороченным впуском». Для судовых среднеоборотных дизелей наиболее эффективно использование газообмена с «укороченным впуском», для высокооборотных с «укороченным сжатием».

Использование цикла Миллера позволяет получить ряд преимуществ в организации рабочего процесса судовых двигателей, таких как: повышение экономичности без увеличения тепловой и механической напряженности, улучшение экологических показателей.

#### Список литературы:

1. Patent № 336,505, dated February 16, 1886. United States Patent Office, James Atkinson, of Hampstead, County of Middlesex, England. 2. Patent № 367,496, dated August 2, 1887. United States Patent Office, James Atkinson, of Hampstead, County of Middlesex, England. 3. Miller R.H. Supercharging and Internal Cooling Cycle for High Output/ Miller R.H. // ASME Transactions, Vol. 69, 1947 – p. 453-457. 4. Patent № 2670595, dated Mar. 2, 1954. United States Patent Office, Ralph Miller, Milwaukee. 5. Miller R.H. Lieberherr H.U. The Miller supercharging system for diesel and gas

engines operating characteristics // CIMAC, 1957, in: Proceedings of the 4th International Congress on Combustion Engines. – Zurich, June 15-22, 1957. – p. 787-803. 6. Clarke D. Simulation, implementation and analysis of the Miller cycle using an inlet control rotary valve, Variable valve actuation and power boost / Clarke D., Smith W.J. // SAE Special Publications. – 1997. – vol. 1258, SAE Paper № 970336. – p. 61–70. 7. Taylor C.F. The Internal Combustion Engine in Theory and Practice, second ed., 1 and 2, M.I.T. Press / Taylor C.F. – Cambridge, MA, 1985. 8. Белоусов Е.В., Белоусова Т.П. Новые подходы в организации рабочих процессов в судовых четырехтактных двигателях / Белоусов Е.В., Белоусова Т.П. // Науковий вісник херсонської державної морської академії: Науковий журнал. – Херсон: вид. ХДМА, 2012.– № 2 (7). – С. 17-25.

#### Bibliography (transliterated):

1. Patent № 336,505, dated February 16, 1886. United States Patent Office, James Atkinson, of Hampstead, County of Middlesex, England. 2. Patent № 367,496, dated August 2, 1887. United States Patent Office, James Atkinson, of Hampstead, County of Middlesex, England. 3. Miller R.H. Supercharging and Internal Cooling Cycle for High Output/ Miller R.H. // ASME Transactions, Vol. 69, 1947 – p. 453-457. 4. Patent № 2670595, dated Mar. 2, 1954. United States Patent Office, Ralph Miller, Milwaukee. 5. Miller R.H. Lieberherr H.U. The Miller supercharging system for diesel and gas engines operating characteristics // CIMAC, 1957, in: Proceedings of the 4th International Congress on Combustion Engines. – Zurich, June 15-22, 1957. – p. 787-803. 6. Clarke D. Simulation, implementation and analysis of the Miller cycle using an inlet control rotary valve, Variable valve actuation and power boost / Clarke D., Smith W.J. // SAE Special Publications. – 1997. – vol. 1258, SAE Paper № 970336. – p. 61–70. 7. Taylor C.F. The Internal Combustion Engine in Theory and Practice, second ed., 1 and 2, M.I.T. Press / Taylor C.F. – Cambridge, MA, 1985. 8. Belousov E.V., Belousova T.P. Novye podhody v organizacii rabochih processov v sudovyh chetyrehtaktnykh dvigateljah / Belousov E.V., Belousova T.P. // Naukovij visnik herson's'koї derzhavnoї mors'koї akademії: Naukovij zhurnal. – Herson: vid. HDMA, 2012.– № 2 (7). – S. 17-25.

Поступила в редакцию 29.05.2013

**Белоусов Евгений Викторович** – канд. техн. наук, доцент, декан факультета судовой энергетики Херсонской государственной морской академии, доцент кафедры эксплуатации судовых энергетических установок

**Чернявский Василий Васильевич** – канд. пед. наук, декан факультета судовождения Херсонской государственной морской академии.

## ЦИКЛ МІЛЛЕРА ТА ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЯ В СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНАХ

*Е.В. Белоусов, В.В. Чернявский*

Розглянуто основні підходи, пов'язані з організацією робочих процесів сучасних судових двигунів з самозайманням від стиснення по циклу Міллера. Проаналізовано основні відмінності між циклами Актінсона і Міллера. Розглянуто відомі способи реалізації робочих процесів за циклом Міллера з «укороченим стисненням» і «укороченим впусканням». Проаналізовано основні переваги та недоліки кожного способу реалізації циклу, і для кожного визначена область його застосування. На підставі наведених даних вироблено ряд рекомендацій по уточненню спеціальної термінології.

## MILLER'S CYCLE AND ITS IMPLEMENTATION IN SHIP DIESEL ENGINES

*E. V. Belousov, V. V. Cherniavskiy*

The main approaches of organizing workflow modern marine engines with compression-ignition cycle by Miller. Analyzes the main differences between the cycles Aktinson and Miller. Describes known how to implement working processes on a cycle Miller «shortened compression» and «shorter inlet». Analyzed the advantages and disadvantages of each method implementation cycle, and for each defined area of application. Based on the data presented a number of recommendations to clarify the specific terminology.