

## НОВЫЕ ПОДХОДЫ В ОРГАНИЗАЦИИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В СУДОВЫХ ЧЕТЫРЕХТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

**Белоусов Е.В.**

*Херсонская государственная морская академия,*

**Белоусова Т.П.**

*Херсонский национальный технический университет*

*В статье рассмотрены теоретические основы работы современных судовых четырехтактных двигателей по циклу Миллера. Показано, что использование различных вариантов реализации рабочего процесса по циклу Миллера позволяет значительно улучшить эффективные и экологические показатели данного класса двигателей. Проанализированы перспективные направления использования цикла Миллера, которые в сочетании с другими мероприятиями, могут привести к дальнейшему совершенствованию рабочих процессов современных судовых дизелей.*

*Ключевые слова: цикл Миллера, двигатель внутреннего сгорания, продленное расширение, укороченное сжатие.*

**Введение.** Ужесточение требований к топливной экономичности и экологической безопасности судовых энергетических установок привело к тому, что многие двигателестроительные фирмы пересматривают свои подходы не только к конструкции вновь создаваемых двигателей, но и к организации их рабочего процесса.

Как одно из наиболее перспективных направлений в настоящее время рассматривается использование цикла Миллера в высокофорсированных судовых среднеоборотных четырехтактных дизелях. Такое решение позволяет одновременно повысить топливную экономичность двигателя за счет продленного расширения и снизить образование окислов азота в отработавших газах, за счет уменьшения теплонапряженности рабочего процесса.

**Анализ состояния проблемы** и последних достижений в области организации рабочего процесса современных судовых ДВС.

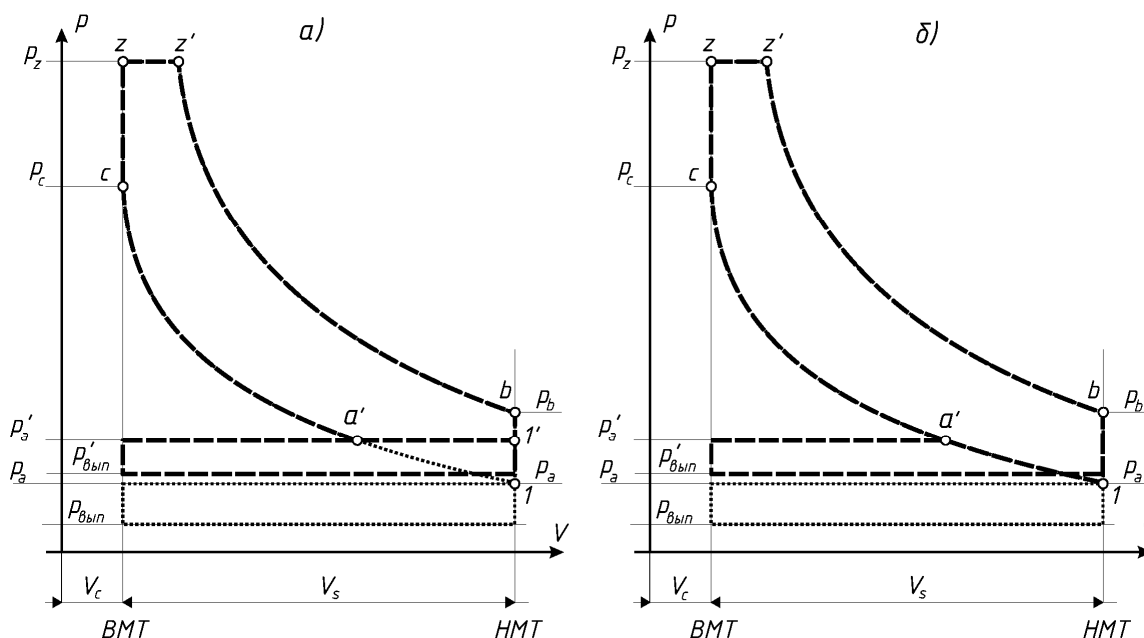


Рисунок 1 – Варианты реализации цикла Миллера: а – с укороченным сжатием; б – с укороченным впуском — — — цикл Миллера; ····· – базовый цикл

Рабочий цикл с продленным расширением был запатентован в 1947 году американским инженером Ральфом Миллером [1]. Основная идея, лежащая в основе

цикла Миллера, это сокращение степени сжатия и увеличение степени расширения рабочего тела.

В своем патенте Миллер рассматривает два варианта организации указанного рабочего процесса со слишком ранним или слишком поздним закрытием впускного клапана [1, 2].

Теоретические циклы для обоих способов реализации рассматриваемого рабочего процесса представлены на рис. 1.

В первом случае, получившем название «укороченного сжатия» при движении поршня от НМТ и до момента закрытия впускного клапана некоторое количество заряда вытесняется во впускной коллектор, а сжатию подвергается лишь та часть заряда, которая осталась в цилиндре (рис. 1 *а*) [2, 3].

Во втором случае, получившем название «укороченного впуска» клапан закрывается задолго до прихода поршня в НМТ (рис. 1 *б*). При этом от момента закрытия клапана и до прихода поршня в НМТ происходит предварительное расширение заряда, а только потом следует его сжатие.

В конечном счете, оба варианта ведут к снижению фактической степени сжатия рабочей смеси по отношению к геометрической. В теоретическом цикле (рис. 1) сжатие начинается не в точке 1, как в базовом цикле, а в точке  $a'$ . При этом степень расширения остается неизменной, в результате чего возрастает эффективность рабочего процесса.

Основным недостатком обеих вариантов реализации цикла Миллера является то, что при прочих равных условиях уменьшается коэффициент наполнения рабочего цилиндра, а значит снимаемая с двигателя мощность, снижается.

Компенсировать потерю мощности при переходе на цикл Миллера возможно повысив начальное давление воздуха применением высокого наддува. На рис. 2 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 [3, 4].

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 [3].

**Цель работы** – определить наиболее перспективные варианты реализации рабочего процесса по циклу Миллера применительно к судовым четырехтактным двигателям.

Учитывая высокий уровень форсирования современных судовых дизелей, особенно важным является то, что использование цикла Миллера позволяет снизить уровень тепловой напряженности рабочего процесса. Объясняется это тем, что для реализации цикла Миллера с таким же максимальным давлением, как и в базовом цикле, воздух в двигатель необходимо подать с большим начальным давлением, что 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 давлении 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. 2 а.

В теоретическом цикле с укороченным впуском, рабочее тело предварительно расширяется, а 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 надувочном 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. 2 б.

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  $a'-1'$ ). Изэнтропийное (адиабатное) 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 [4].

Характер протекания кривой давления на  $pV$ -диаграмме непосредственно связан с той работой, которую совершают газы за цикл. Кривая температур на  $TV$ -диаграмме непосредственно не характеризует работу, однако уровень действующих температур влияет на величину тепловых потерь, что в конечном итоге оказывает влияние на эффективность цикла (рис. 2). Косвенно, изменение параметров газообмена по циклу Миллера влияет и на качество сгорания топлива, так как понижение температуры ведет к изменению характера протекания предпламенных процессов в камере сгорания двигателя.

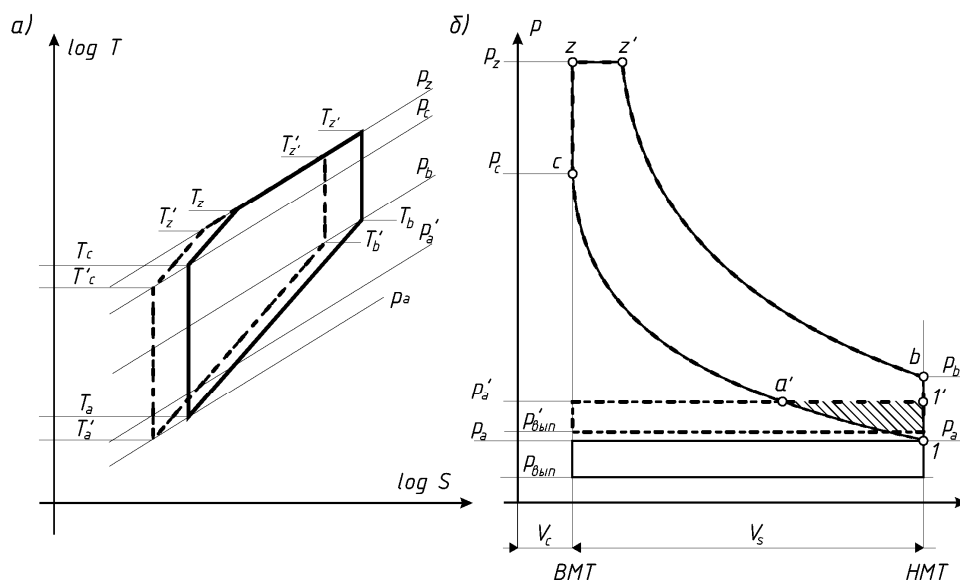


Рисунок 2 – Совмещенные диаграммы рабочих процессов базового двигателя и организованных по циклу Миллера с укороченными сжатием и впуском в  $TS$ -координатах (а) и в  $pV$ -координатах (б): — — — базовый цикл; — — — с укороченным сжатием; - - - - с укороченным впуском

На рисунке 2 б показаны совмещенные диаграммы рабочих процессов организованных по циклу Миллера и рабочий процесс базового двигателя в  $pV$ -координатах, аналогичные тем, что показаны на рис. 2 а 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.

Если проанализировать теоретические циклы двигателей работающих по циклу Миллера, можно сделать вывод, что, при прочих равных условиях, их КПД будет ниже чем в базовом цикле за счет потери части положительной работы на участке газообмена между линией сжатия и НМТ (заштрихованная область на рис. 2 б). Потеря части полезной работы на участке газообмена, получившая название «потери Миллера», при прочих равных условиях 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, 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.

Для количественной оценки влияния выбранных фаз газораспределения на характер протекания рабочего процесса используется безразмерный показатель называемый коэффициентом Миллера:

$$m = S_M/S,$$

где  $S_M$  – часть хода поршня в цикле Миллера затрачиваемая на сжатие;  $S$  – полный ход поршня.

Исходя из этого, в двигателях, работающих по циклу Миллера необходимо разделять понятия степень сжатия и степень расширения. Степень расширения определяется из соотношения  $\epsilon = (V_c + V_s)/V_c$  (рис. 2 б), а степень сжатия зависит от коэффициента Миллера и определяется из соотношения  $\epsilon_M = m(\epsilon - 1) + 1$

В наиболее общем виде для оценки влияния коэффициента Миллера на эффективность рабочего процесса при прочих равных условиях может быть использовано выражение:

$$\Delta\eta = \Delta\eta_{\text{зц}} + \Delta\eta_{\text{го}},$$

где  $\Delta\eta_{\text{зц}}$  – эффективность замкнутого цикла;  $\Delta\eta_{\text{го}}$  – эффективность процесса газообмена.

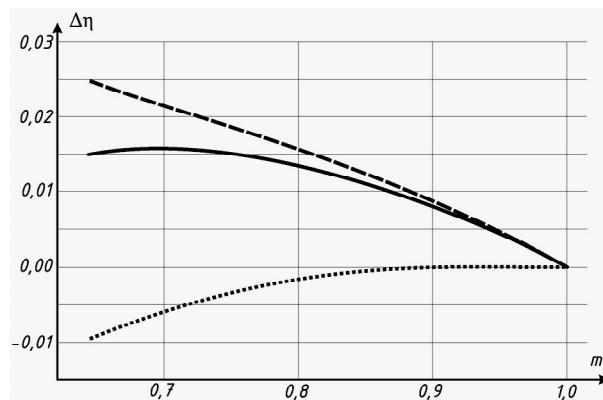


Рисунок 3 – Эффективность рабочего процесса (—) как сумма эффективности замкнутого цикла (---) и процесса газообмена (.....)

На рис. 3 представлено влияние составляющих эффективности рабочего процесса на общую эффективность цикла как функция коэффициента Миллера. Из рисунка видно, что эффективность замкнутого цикла увеличивается практически прямопропорционально с уменьшением коэффициента Миллера. Эффективность процесса газообмена остается практически неизменной в пределах изменения  $m \approx 0,85 \dots 1,0$ . Дальнейшее увеличение  $m$  сопровождается резким увеличением потерь на дросселирование и «потерь Миллера». Для большинства двигателей оптимальное значение  $m$  лежит в пределах 0,68...0,72 [4].

**Решение проблемы.** Исходя из сказанного выше, можно сделать выводы, что использование цикла Миллера позволяет получить ряд преимуществ в организации рабочего процесса двигателей без увеличения их тепловой и механической напряженности. Некоторые из вариантов организации рабочего процесса с использованием цикла Миллера представлено на рис. 4. Для сравнения на всех рисунках штриховой линией приводится базовый цикл двигателя.

На рис. 4 а, представлен цикл Миллера с начальным давлением соответствующим базовому рабочему процессу. Видно, что применение данного цикла позволяет снизить максимальное давление и давление в конце расширения, что ведет к уменьшению механических потерь в двигателе и возрастанию его термодинамической эффективности.

Недостатком рассмотренного на рис. 4 а варианта является снижения мощности, вызванное уменьшением весового заряда цилиндра. Этот недостаток может быть устранен путем повышения плотности воздуха за счет увеличения его начального давления. При этом значения параметров состояния рабочего тела в ключевых точках будут такими же, как и в базовом цикле (рис. 4 б). При неизменной цикловой подаче топлива это позволяет повысить коэффициент избытка воздуха, что приводит к улучшению условия сгорания топлива.

Потеря мощности может быть скомпенсирована путем увеличения геометрической степени сжатия (рис. 4 в). При равном начальном давлении, эффективность рабочего процесса по сравнению с базовым циклом будет выше. Однако низкое давление в конце расширения может оказаться недостаточным для эффективной работы турбокомпрессора. Этот недостаток может быть устранен за счет увеличения доли теплоты подводимой на линии расширения (рис. 4 г), что может быть достигнуто путем увеличением цикловой подачи или переносом процесса сгорания на линию расширения, за счет более поздней подачи топлива. Кроме того, такой подход позволит повысить мощность двигателя. Еще более эффективным такой подход может быть в сочетании с увеличением степени сжатия (рис. 4 е).

В качестве перспективного можно рассматривать комплексный подход к организации рабочего процесса по циклу Миллера, когда одновременно используется высокий наддув, увеличенная степень сжатия и перенос большей части подвода теплоты на линию расширения. Это позволяет максимально использовать пространство рабочего цилиндра для получения работы без увеличения механической и тепловой напряженности. Недостатком такого рабочего процесса является более высокое давление в конце расширения (рис. 4 ж). Однако при использовании систем высокого наддува, особенно с двумя ступенями сжатия, такой потенциал может оказаться просто необходим для эффективного функционирования турбокомпрессоров.

Различные комбинации приведенных выше вариантов позволяют значительно расширить возможности организации рабочего процесса судового дизеля в зависимости от того какие задачи ставятся как приоритетные при его проектировании.

Характер протекания газообмена у реальных двигателей, работающих по циклу Миллера с укороченным впуском и укороченным сжатием, показан на рис. 5. Для сравнения на каждом из рисунков показан процесс газообмена этого же двигателя при его работе по традиционному циклу. При этом, мощность двигателя работающего по циклу Миллера, за счет повышения давления наддува ( $p'_{над}$ ), такая же, как и у двигателя с традиционной системой газообмена имеющем более низкое давление наддува ( $p_{над}$ ).

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 (участок НМТ-3'' рис. 5 б). Кроме того, предварительное расширение,

предшествующее сжатию приводит к понижению температуры рабочего тела непосредственно в рабочем цилиндре, по этому, цикл Миллера с укороченным впуском еще называют циклом с внутренним охлаждением заряда;

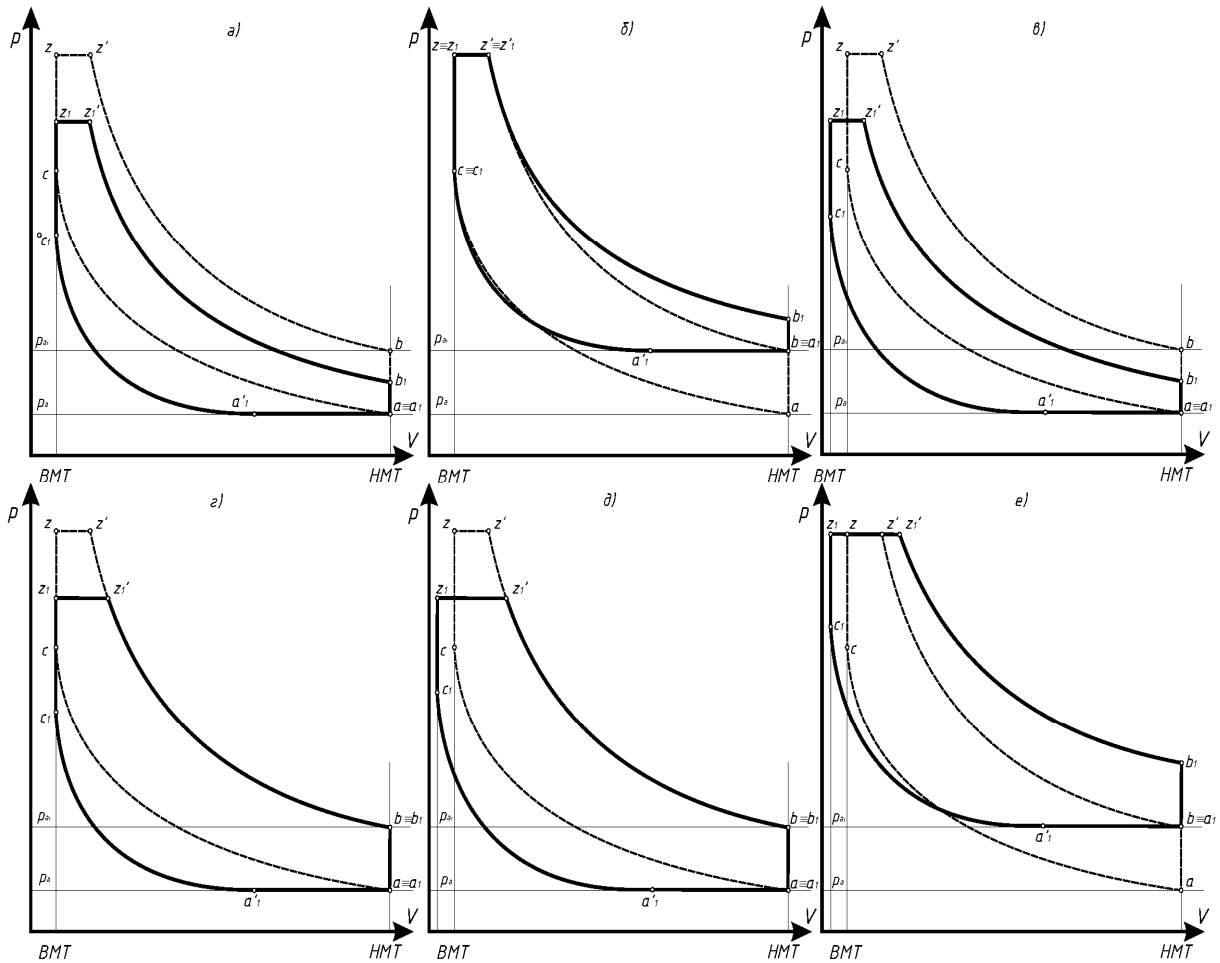


Рисунок 4 – Варианты реализации цикла Миллера в сравнении с базовым циклом:

*a* – с одинаковым начальным давлением; *б* – с повышенным начальным давлением и одинаковым максимальным давлением; *в* – с одинаковым начальным давлением и увеличенной степенью сжатия; *г* – с одинаковым начальным и конечным давлением за счет продления подвода теплоты; *д* – с увеличенной степенью сжатия и одинаковым конечным давлением; *е* – с одинаковым начальным и максимальным давлением, увеличенной степенью сжатия, продленным подводом теплоты

– 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 (участок НМТ-3''' рис. 5 б).

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 теоретическое охлаждение заряда цилиндра, по сравнению с ранним закрытием (рис. 6).

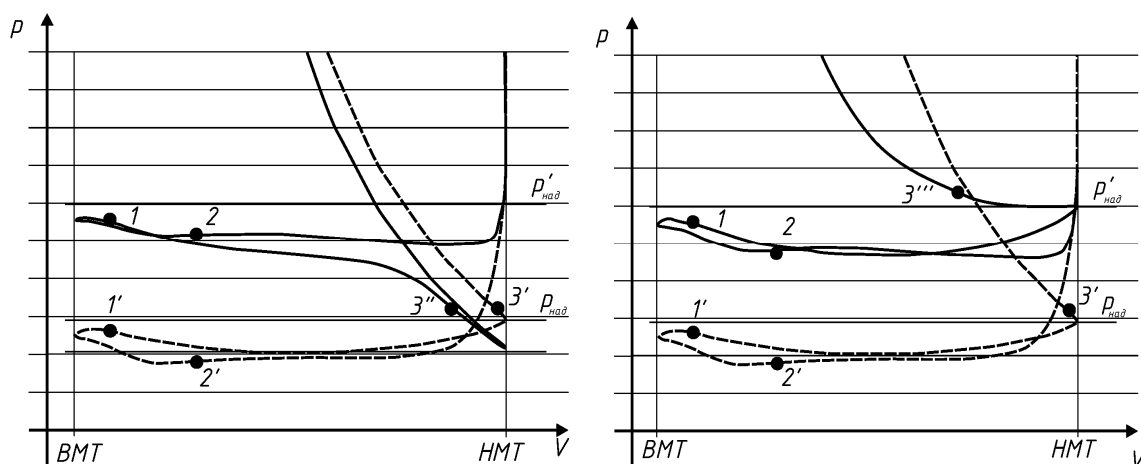


Рисунок 5 – Газообмен в двигателях работающих по циклу Миллера:

*a* – с укороченным впуском; *b* – с укороченным сжатием. 1, 1' – открытие выпускного клапана; 2, 2' – закрытие выпускного клапана; 3' – закрытие впускного клапана в базовом цикле; 3'' – раннее закрытие впускного клапана; 3''' – позднее закрытие впускного клапана

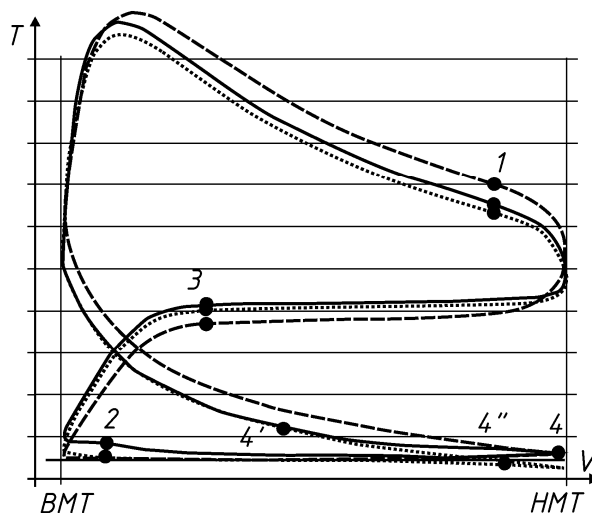


Рисунок 6 – Изменение температуры в рабочем процессе для базового цикла (---), в цикле с укороченным сжатием (—) и в цикле с укороченным впуском (- - - -)

1 – момент открытия выпускного клапана; 2 – момент закрытия выпускного клапана; 3 – момент открытия впускного клапана; 4 – момент закрытия впускного клапана в базовом цикле; 4' – момент закрытия впускного клапана в цикле с укороченным сжатием; 4'' – момент закрытия впускного клапана в цикле с укороченным впуском

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, обеспечивающий максимальное проходное сечение клапанной щели.

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 и двигателей, работающих в широком диапазоне нагрузочно-скоростных режимов, предпочтение отдают циклу Миллера с укороченным сжатием, а для двигателей, работающих при постоянной частоте вращения

на режимах близких к номинальной мощности преимущественно используют цикл Миллера с укороченным впуском.

Использование в течение двух предыдущих десятилетий циклов Миллера в современных судовых четырехтактных двигателях позволило большинству ведущих двигателестроительных фирм, успешно решили комплекс проблем по переводу средне- и высокооборотных двигателей для работы на тяжелом топливе. Помимо существенных изменений в конструкции таких двигателей, кардинальным изменениям подвергся их рабочий процесс. В первую очередь это связано с тем, что тяжелые топлива отличаются достаточной высокой энергией активации, под которой понимается количество теплоты, которое нужно подвести к топливу, прежде чем оно начнет реагировать с кислородом воздуха. Учитывая, что время на сгорание топлива в средне- и высокооборотных двигателях на порядок меньше чем у малооборотных (у МОД при  $100 \text{ мин}^{-1}$  на процесс сгорания отводится  $80...100 \text{ мс}$ , у ВОД при  $1000 \text{ мин}^{-1}$   $5...8 \text{ мс}$ ), для качественного сгорания топлива энергия активации должна быть подведена как можно быстрее. Увеличить скорость подвода теплоты к топливу, для сокращения времени предпламенных процессов можно увеличив температуру воздушного заряда, и уменьшив размер капель топливного аэрозоля. На практике первое достигается путем повышения температуры в конце сжатия, а второе повышением давления распыливания топлива. Для повышения температуры в конце  $T_c$  сжатия до  $900...1200 \text{ К}$ , в такого рода двигателях, повышают степень сжатия и давление наддува. В результате этого давление в конце сжатия  $p_c$ , может достигать  $12...17,5 \text{ МПа}$ , что находится на границе близкой к предельно допустимым давлениям исходя из пределов прочности используемых материалов. В этой связи сгорание в рабочем пространстве двигателя должно происходить без значительного повышения давления. Это достигается путем перенесения процесса сгорания из области расположенной в непосредственной близости от ВМТ на линию расширения. Теоретически такой цикл ближе к идеальному циклу Дизеля, чем к циклу Тринклера-Саботе. Смещение процесса сгорания на линию расширения достигается уменьшением угла опережения впрыска, а также использованием специальных законов подачи топлива, в том числе и ступенчатого многократного впрыска. При работе двигателя по циклу Миллера с процессом сгорания перенесенным на линию расширения степень повышения давления  $\lambda$  обычно лежит в пределах  $1...1,3$ . Для достижения заданных параметров рабочего тела к концу сжатия давление наддува повышают до  $0,3...0,4 \text{ МПа}$ , а степень сжатия до  $13...16$ .

Снижение термического КПД поршневой части двигателя связанное с увеличением степени предварительного расширения  $\rho$ , компенсируется применением турбокомпрессоров с более высоким КПД способных эффективно сработать более высокий перепад температур.

**Выводы.** Переход в организации рабочего процесса на цикл Миллера позволил улучшить эффективные показатели современных среднеоборотных двигателей. Тем не менее, проведенный в работе анализ, показывает, что исчерпаны еще далеко не все резервы в совершенствовании рабочего процесса. Такие показатели как давление наддува с последующим охлаждением воздуха позволяет значительно повысить степень расширения в двигателе, что ведет к повышению его эффективности. Это актуально еще и по тому, что у двигателей, работающих по циклу Миллера, имеется значительный резерв энергии отработавших газов, эффективное использование которых позволяет значительно улучшить показатели двигателя.

В перспективе, более детальное исследование рабочих процессов по циклу Миллера, с использованием высокого и сверхвысокого наддува позволит значительно улучшить показатели судовых дизелей как с точки зрения их экономичности, так и по экологическим показателям.



**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Clarke D., Smith W. J. Simulation, implementation and analysis of the Miller cycle using an inlet control rotary valve, Variable valve actuation and power boost, SAE Special Publications. – 1997. – Vol. 1258, SAE Paper No. 970336. – P. 61-70.
2. Taylor C. F. The Internal Combustion Engine in Theory and Practice. – Second ed., 1 and 2. – M.I.T. Press, Cambridge, MA, 1985.
3. Wik C., Hallback B. Reducing emissions using 2-stage turbo charging // Wartsila technical journal. – 2008. – № 01. – P. 35-41.
4. Codana E., Vlaskosa I. Turbocharging medium speed diesel engines with extreme Miller timing. ABB Turbo Systems Ltd, Bruggerstrasse 71a, CH-5401 Baden, Switzerland. ABB Turbo Systems Ltd, Bruggerstrasse 71a, CH-5401 Baden, Switzerland. – 20 p.

**Білоусов Є.В., Білоусова Т.П. НОВІ ПІДХОДИ ОРГАНІЗАЦІЇ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ У СУДНОВИХ ЧОТИРИТАКТНИХ ДВИГУНАХ**

*У статті розглянуто теоретичні основи роботи сучасних суднових чотиритактних двигунів по циклу Міллера. Показано, що використання різних варіантів реалізації робочого процесу по циклу Міллера дозволяє значно поліпшити ефективні та екологічні показники даного класу двигунів. Проаналізовано перспективні напрямки використання циклу Міллера, які у поєднанні з іншими заходами, можуть призвести до подальшого вдосконалення робочих процесів сучасних суднових дизелів.*

*Ключові слова: цикл Міллера, двигун внутрішнього згоряння, продовжене розширення, вкорочений стиск.*

**Belousov E.V., Belousova T.P. NEW APPROACHES WORKFLOW IN MARINE FOUR-STROKE ENGINES**

*The article describes the theoretical foundations of the modern four-stroke marine engines on a cycle of Miller. It is shown that the use of different options for implementing workflow Miller cycle can significantly improve the efficiency and environmental performance of this class of engines. Analyzed promising application of Miller cycle, which, combined with other measures, could lead to further improvement of work processes of modern marine diesel engines.*

*Keywords: Miller cycle, internal combustion engine, prolonged expansion, short compression.*