

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ВО ВНУТРЕННЕМ КОНТУРЕ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА

В.С. Кукис, П.К. Сеначин, А.И. Рыбалко

В статье рассмотрены известные из литературы варианты термодинамического описания процессов во внутреннем контуре двигателя Стирлинга. Предложена и обоснована новая термодинамическая модель, состоящая из восьми политропных процессов и позволяющая более точно отображать мощностные и экономические показатели рабочего цикла.

Ключевые слова: двигатель Стирлинга; внутренний контур, рабочий цикл, термодинамическая модель двигателя.

Введение

При исследовании теплоэнергетических силовых установок, работающих по замкнутому (или условно замкнутому) циклу, широко используется представление протекающих в установке физических явлений определенной совокупностью термодинамических процессов – термодинамической моделью.

Следует подчеркнуть, что любая термодинамическая модель описывает реальные процессы с той или иной степенью приближения. Это обусловлено принятыми при ее составлении допущениями и предположениями, цель которых – упростить модель, сделать ее удобной для использования. Чрезмерное упрощение модели может привести к потере точности; желание детализировать ее – к усложнению. Поэтому важно найти компромисс между простотой и полнотой описания, критерием при этом должна служить адекватность используемой модели, т. е. правильное качественное и количественное (с некоторой разумной степенью точности) описание процессов.

Для описания энергетических явлений, совершающихся во внутреннем контуре (ВК) двигателя Стирлинга (ДС), предложен ряд термодинамических моделей. Рассмотрим их.

Известные термодинамические модели процессов, протекающих во внутреннем контуре двигателя Стирлинга

На рисунке 1 показана схема осуществления рабочего процесса во внутреннем контуре ДС широко распространенного вытеснительного типа β -модификации.

Условимся, что цикл начинается с момента, когда вытеснитель находится в предельно верхнем положении и не движется, а рабочий поршень – в предельно нижнем и

начинает перемещаться вверх. В это время происходит сжатие рабочего тела, которое сопровождается отводом от него теплоты вовне к теплоприемнику при постоянной температуре.

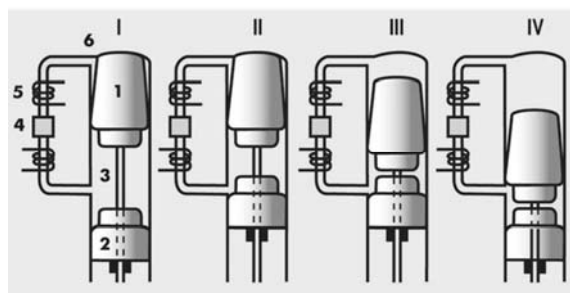


Рисунок 1 - Схема осуществления рабочего процесса во внутреннем контуре двигателя Стирлинга: 1 – вытеснитель; 2 – рабочий поршень; 3 – холодная полость;

I – Рабочий поршень находится в крайнем нижнем положении, а вытеснитель – в крайнем верхнем (весь газ – в холодной полости).

II – Вытеснитель остается в верхнем положении (рабочий поршень сжимает газ при низкой температуре).

III – Рабочий поршень остается в крайнем верхнем положении (вытеснитель переталкивает газ из холодной полости в горячую).

IV – Нагретый газ расширился. Рабочий поршень и вытеснитель находятся в своих крайних нижних положениях (в то время как поршень остается на месте, вытеснитель переталкивает газ в холодную полость, затем цикл повторяется)

Допускается, что взаимодействие с внешней средой мгновенно передается по всему объему, в результате чего температура рабочего тела по его массе одинакова и равна температуре теплоприемника. В результате совершается обратимый изотермический процесс 1–2 (рисунок 2,а).

В процессе 2–3 рабочий поршень находится в предельно верхнем положении, а вытеснитель движется вниз. Рабочее тело перемещается из нижней (холодной) полости в верхнюю (горячую), проходя через регенератор и нагреваясь от его насадки. Считается, что при этом вся масса рабочего тела переходит из холодной полости в горячую и совершается обратимый изохорный процесс 2-3.

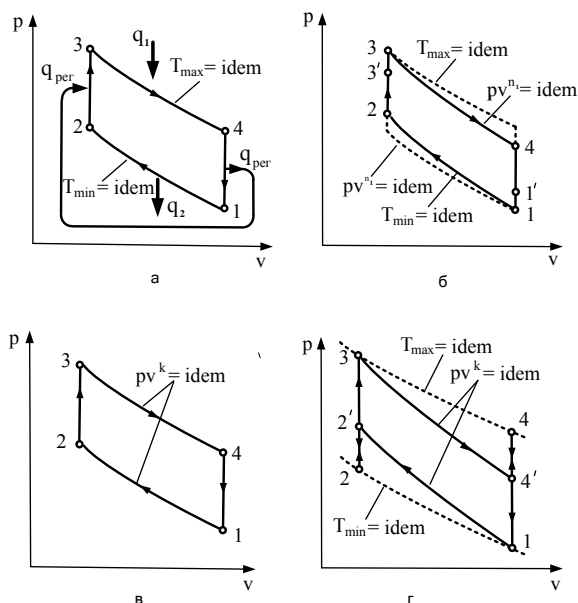


Рисунок 2 - Термодинамические модели процессов, протекающих во внутреннем контуре двигателя Стирлинга

К моменту начала расширения (т. 3 рисунок 2,а) вытеснитель предельно приближается к рабочему поршню и вместе с ним начинает перемещаться вниз. В этот период времени происходит расширение рабочего тела, сопровождающееся подводом к нему извне при постоянной температуре. Допускается, что температура рабочего тела по всей массе одинакова и равна температуре теплоисточника. Происходящий при этом процесс отображается на диаграмме линией 3–4 (рисунок 2,а).

Завершается цикл возвращением вытеснителя в предельно верхнее положение, во время которого рабочее тело без изменения объема (так как рабочий поршень остается неподвижным) перемещается из верхней горячей полости в нижнюю холодную, проходя через регенератор, охлаждаясь и отдавая теплоту его насадке. Считается, что при этом вся масса рабочего тела участвует в процес-

се и в конце его поступает в холодную полость. На диаграмме (рисунок 2,а) цикл замыкается обратимой изохорой 4–1. Рассмотренный вариант описания процессов, происходящих во внутреннем контуре ДС, называют циклом Стирлинга.

Как видно, он представляет собой совокупность четырех обратимых термодинамических процессов: изотермического сжатия 1–2, сопровождающегося отводом теплоты от рабочего тела вовне к теплоприемнику; изохорного подвода теплоты к рабочему телу в регенераторе (процесс 2–3), изотермического расширения 3–4 с сообщением теплоты рабочему телу извне от теплоисточника и изохорного отвода теплоты от рабочего тела в регенераторе (процесс 4–1). Такой цикл является одним из возможных вариантов, так называемого, обобщенного регенеративного цикла Карно, и обеспечивает получение максимально высокого КПД по сравнению с любыми другими циклами, совершающимися в том же диапазоне изменения температуры рабочего тела. Указанное обстоятельство позволяет называть рассмотренный цикл «идеальным».

Как видно, реализация цикла Стирлинга требует, чтобы:

1. Движение вытеснителя и рабочего поршня было прерывистым.
2. Рабочее тело периодически полностью находилось то в горячей, то в холодной полостях, т.е. чтобы ВК двигателя не имел неизменяемых объемов (нагревателя, регенератора, охладителя и соединительных каналов).
3. Термодинамические процессы, составляющие цикл, были полностью обратимы.
4. Изменение температуры рабочего тела между ее минимальным и максимальным значениями происходило только за счет регенеративного теплообмена.
5. Масса рабочего тела в ВК была неизменной, т.е. отсутствовала утечка рабочего тела.

Существенное отличие цикла Стирлинга от реально происходящих в двигателе процессов побудило исследователей к попыткам создания более точных вариантов описания термодинамических явлений в ВК.

А.А. Бундин [1] предложил рассматривать процессы подвода теплоты от внешнего источника и отвода ее к холодильнику, сопровождающиеся изменением объема, как обратимые политропные (рисунок 2,б, процессы 1–2 и 3–4) с показателем n_1 . Это впол-

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ВО ВНУТРЕННЕМ КОНТУРЕ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА

не реалистическое предположение, так как вследствие существования «челночных» потерь при движении рабочего тела между горячей и холодной полостями, а также конечных значений тепловых потоков идеальные изотермические условия не достигаются. Кроме того, автором принимается во внимание тот факт, что при перемещении из горячей полости в холодную рабочее тело охлаждается в регенераторе не до состояния 1, которому соответствует минимальная температура цикла, а лишь до $t. 1'$. Этим учитывается неполнота регенеративного охлаждения, т. е. отклонение этого процесса от идеального. Неполным в предлагаемой модели является и регенеративный нагрев (он происходит до $t. 3'$).

Таким образом, рассмотренный цикл ближе к реальному протеканию процессов в ВК, так как учитывает неполноту регенерации теплоты, неизотермичность процессов внешнего теплообмена в ходе сжатия и расширения, а также необходимость внешнего теплообмена в изохорных процессах.

В работе [2] для описания процессов в ВК используется термодинамическая модель, названная авторами регенеративным циклом Отто (рисунок 2,в). Здесь процессы сжатия и расширения предполагаются протекающими без внешнего теплообмена (адиабаты 1–2 и 3–4 соответственно). Теплота, отводимая насадке регенератора на изохорном участке 3–4', затем возвращается рабочему телу на участке 2–2' (некоторой «потерей»). Внешний теплообмен происходит на участках изохор: 4'–1– отвод и 2'–3 – подвод.

Рейллис и Уриелли [3] предложили модель псевдоцикла Стирлинга, в которой изотермические процессы заменены политропными и в пределе адиабатными (рисунок 2,г).

Идеальный изотермический процесс 1–2 заменяется адиабатным 1–2'' и изохорным процессом переохлаждения 2''–2. Аналогично процесс 3–4 заменяется процессами 3–4' и 4'–4. Получаемые расчетно значения термического КПД псевдоцикла Стирлинга достаточно хорошо согласуются с измеренными значениями. Однако принципиальных уточнений «идеального» цикла в сравнении с предыдущей моделью псевдоцикл не дает. В тоже время представляется весьма спорной, целесообразность привязки процессов внешнего теплообмена к изохорным процессам 2''–2 (внешнее охлаждение) и 4'–4 (внешний нагрев) и полное его исключение в процессах сжатия и расширения газа.

Исследования [4] показали, что для двигателей компоновочной модификации рабочий поршень – вытеснитель в одном цилиндре (β -модификации), например, циклы, состоящие из четырех процессов, неадекватны, так как теплообмен в регенераторе происходит не в изохорных условиях.

Одним из вариантов, учитывающих это, является «изотермический» и «адиабатный» циклы Рейллиса [3].

«Изотермический» цикл (рисунок 3,а) состоит из обратимых изотермических процессов внешнего теплообмена (процесс 4–5 – подвод теплоты от внешнего источника, процесс 1–2–отвод теплоты внешнему приемнику) и двух обратимых регенеративных процессов, осуществляемых частично при неизменном объеме, частично при неизменном давлении (процессы 5–6, 6–1 и 2–3, 3–4).

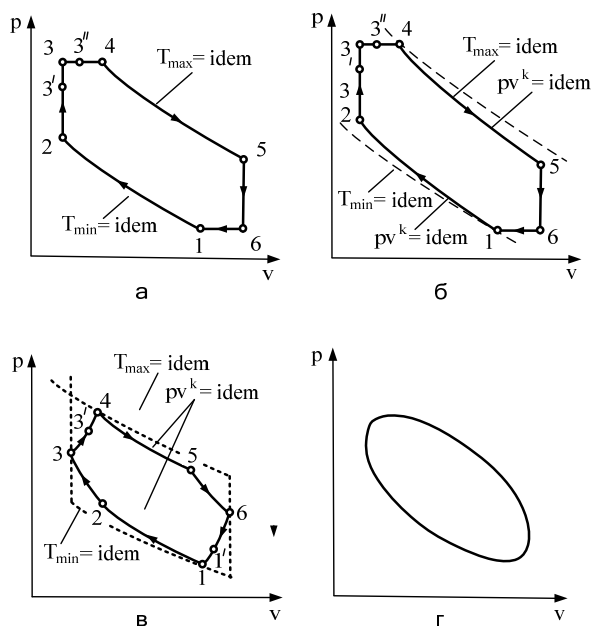


Рисунок 3 - Термодинамические модели процессов, протекающих во внутреннем контуре двигателя Стирлинга

Как видно, в этом случае учитывается то, что процессы регенерации совершаются и при изменении объема рабочего тела. Охлаждение газа в регенераторе происходит от T_{max} до T_{min} , но предполагается возможность неполного возврата теплоты насадкой рабочему телу (до $t. 3'$ или $3''$).

В реальных двигателях процессы сжатия и расширения, как уже говорилось, не протекают изотермически. В общем случае такие процессы являются политропными, но часто

при анализе идеализированных циклов они заменяются адиабатными. Такая замена характерна и для «адиабатного» цикла Рейллиса (рисунок 3,б).

Таким образом, в циклах Треска и Рейллиса учтена неизохорность процессов регенерации теплоты, что является важным шагом на пути приближения описания цикла к действительному развитию процессов в ВК. Однако в «изотермическом» варианте цикла не учтена необходимость «доохлаждения» рабочего тела за счет отвода теплоты вовне в ходе перемещения газа из горячей полости в холодную. В «адиабатном» варианте вообще отсутствует внешний теплоотвод.

Более универсален при описании процессов в ВК обобщенный термодинамический цикл, предложенный В.И. Евенко [5] (рисунок 3,в). Здесь в сравнении с «идеальным» циклом изотермы внешнего теплообмена заменены на политропы с показателями n_1 и n_2 , изохоры процессов регенерации – на политропы с показателями n_3 , n_4 , n_5 и n_6 . При этом учитывается, что рабочее тело охлаждается в регенераторе не до минимальной температуры, а во время регенеративного нагрева температуры повышается не до максимальной. Это дает возможность учесть неполноту процессов регенерации.

Однако автор без каких-либо на то оснований считает, что в т.т. 3 и 6 (точках изменения характера процессов регенеративного теплообмена) температура одинакова и равна полусумме температур в т.т. 2 и 4, т.т. 1 и 5 соответственно. Кроме того, нет рекомендаций по поводу выбора положения т.т. 1 и 4 (моментов начала сжатия и расширения по политропам с показателями n_2 и n_1 соответственно).

Таким образом, краткое рассмотрение известных по литературе моделей циклов ДС показывает, что они либо существенно неадекватны процессам, происходящим в ВК, либо носят абстрактный характер, что не позволяет использовать их для анализа в каких-либо конкретных условиях организации цикла.

Предлагаемое уточнение описания термодинамического описания процессов, протекающих во внутреннем контуре двигателя Стирлинга

Реальные индикаторные диаграммы, получаемые при испытаниях ДС, существенно отличаются от рассмотренных выше вари-

антов описания процессов, совершающихся в ВК.

Внешнее отличие проявляется в том, что вся совокупность процессов на диаграмме представляется кривой линией, образующей замкнутый контур эллипсообразной формы (рисунок 3,г). причиной этого является непрерывное и плавное перемещение рабочего поршня, обуславливающее непрерывное и плавное изменение объема газа.

Существуют и глубокие внутренние (скрытые внешние) отличия рассмотренных выше моделей цикла от реальных процессов. Прежде всего при построении каждой из них предполагалось, что отдельные процессы совершаются последовательно всей массой рабочего тела, которая в различные моменты реализации цикла находится то в одной, то в другой, то в третьей и т.д. полостях ВК. При осуществлении действительного цикла эта масса каким-то образом распределена по всему контуру. Часть рабочего тела всегда находится в горячей полости, часть – в холодной, часть – в нагревателе, часть – в регенераторе, часть – в охладителе. Распределение газа между этими элементами осуществляется вытеснителем и в связи с безостановочным движением последнего непрерывно меняется.

Кроме того, при построении моделей допускалось, что каждый из основных четырех процессов цикла протекает в соответствующей полости, имеющей свое специфическое назначение. Результаты экспериментальных исследований показывают, что это не так. Индикаторные диаграммы и графики температуры, отражающие состояние рабочего тела и горячей и холодной полостях двигателя, свидетельствуют о том, что характер изменения давления и температуры газа в каждый момент времени весьма близок как в той, так и в другой полостях. При этом качественно поведение параметров рабочего тела в любой точке ВК практически соответствует тем изменениям, которые происходят в рассматриваемый момент с основной массой газа. Существует лишь определенная разница максимальных и минимальных величин указанных параметров, а также некоторый сдвиг по углу поворота коленчатого вала, при котором достигаются эти экстремальные значения.

Из графика изменения давления в полостях экспериментального ДС вытеснительного типа (рисунок 4) видно, что холодной полости характерен несколько больший диапазон изменения давлений, чем в горячей.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ВО ВНУТРЕННЕМ КОНТУРЕ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА

В исследованном авторами двигателе минимальные величины давлений на различных режимах работы отличались на 4–5 %, максимальные – на 5–6 %. Аналогичные данные можно найти и в литературе. Например, в исследованиях [6] соответствующие перепады при частоте вращения коленчатого вала $n = 500 \text{ мин}^{-1}$ составили 5,6 и 2,6 %, а при $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ – 7,2 и 4,5 %.

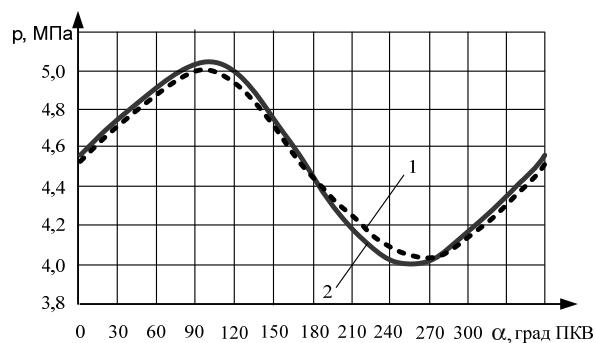


Рисунок 4 - Диаграмма изменения давления во внутренней полости двигателя Стирлинга: 1 – горячая полость; 2 – холодная полость

Достижение экстремальных значений параметров в холодной полости всегда происходит раньше, чем в горячей. Связано это с тем, что в организации процессов сжатия и расширения определяющую роль играет закон изменения объема рабочего тела, который формируется перемещением поршня, являющегося одной из подвижных стенок холодной полости. Поэтому все последствия сжатия и расширения в плане изменения параметров рабочего тела проявляются, прежде всего, здесь. На поведении параметров газа в горячей полости сказывается гидравлическое сопротивление соединяющего полости тракта (охладителя, регенератора и нагревателя), которое приводит к определенному запаздыванию достижения экстремумов давления в горячей полости. Для двигателя максимальное давление в горячей полости создается с запаздыванием примерно на 5, минимальное – на 10 град ПКВ. В работе [6] эти значения были соответственно 4 и 13 град ПКВ. Неодинаковость запаздывания обусловлена разницей плотности рабочего тела (а, следовательно, и гидравлического сопротивления) на разных температурных уровнях.

Температура газа в различных полостях отличается существенно (рисунок 5). Максимум температуры газа в холодной полости

практически в два раза ниже, чем в горячей (что вполне объяснимо значительным отводом теплоты в охладителе, в стенки полосы и к насадке регенератора). Достигается максимум с запаздыванием на 10–15 град ПКВ относительно горячей полости. Обуславливается это временными особенностями процесса передачи теплоты от места нагрева газа (горячая полость и нагреватель) к рабочему телу, находящемуся в холодной полости.

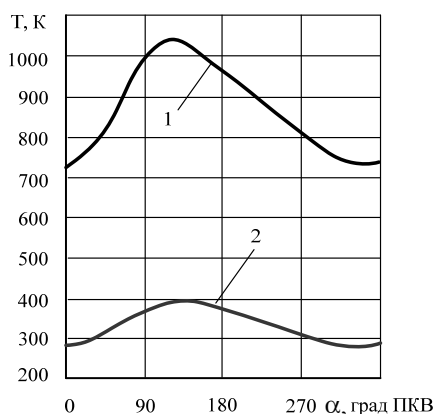


Рисунок 5 - Диаграмма изменения температуры во внутренней полости двигателя Стирлинга: 1 – горячая полость; 2 – холодная полость

Минимальные значения температур в полостях отличаются еще больше. В горячей полости минимум достигается через 30–35 град ПКВ после того, как это произошло в холодной. Неодинаковость разницы в моментах достижения максимальных и минимальных значений температуры в различных полостях обуславливается соответствующим изменением теплопроводности газа на различных температурных условиях.

Отмеченная разница температур в различных полостях двигателя Стирлинга в каждый момент времени при определении состояния газа во внутреннем контуре может быть скорректирована введением эквивалентной температуры [6]. В результате появляется возможность построения индикаторной диаграммы с некоторыми усредненными по внутреннему контуру параметрами, считая состояние газа квазиравновесными [7].

Как было указано, изменение этих состояний в реальном двигателе происходит непрерывно и изображается на диаграмме плавной линией. Математическая обработка опытных данных позволяет подобрать аналитические зависимости, достаточно точно ап-

проксимирующие экспериментальные кривые. Однако формальное математическое описание линии, внешне отображающей сложную совокупность физических явлений, протекающих во внутреннем контуре, исключает возможность последующего термодинамического анализа процессов и оценки реальной энергетической картины явлений. Единственным путем, открывающим возможность использования для исследований современного мощного термодинамического аппарата, является описание линии индикаторной диаграммы определенной совокупностью термодинамических процессов. Максимальное приближение к реальной диаграмме может быть достигнуто ее аппроксимацией весьма большим количеством политроп. Однако при таком решении задачи неизбежно возникнут трудности, обусловленные, с одной стороны, громоздкими расчетами параметров цикла, составленного из большого количества процессов, с другой – неопределенностью выбора точек, служащих границами каждого из этих процессов. Поэтому решение задачи достаточно корректной аппроксимации реальной диаграммы должно сводиться к ее описанию логически оправданным количеством политроп с четким обоснованием границ каждой из них.

Анализ рабочего процесса во внутреннем контуре ДС с учетом кинематики механизма привода поршня и вытеснителя позволяет разделить линию индикаторной диаграммы на участки, соответствующие каждому из четырех основных этапов рабочего цикла (регенеративным нагреву и охлаждению, подводу теплоты извне и ее отводу во вне). Поскольку в реальном двигателе процессы регенерации совершаются не при неподвижном поршне, то, очевидно, что регенеративный нагрев, например, начинается до прихода рабочего поршня в ВМТ (т.е. сопровождается сжатием рабочего тела) и заканчивается после ее прохождения (т.е. в условиях расширения рабочего тела). Аналогично процесс регенеративного охлаждения начинается при продолжающемся расширении рабочего тела (до прихода поршня в НМТ) и заканчивается в условиях сжатия (после прохождения им НМТ).

Учитывая, что для осуществления этих процессов необходимо проталкивание рабочего тела вытеснителем через регенератор, логично считать, что регенеративный теплообмен происходит в то время, когда абсолютная скорость перемещения вытеснителя больше, чем у поршня. Соответственно про-

цессы внешнего теплообмена происходят в периоды, когда скорость рабочего поршня по абсолютной величине превышает скорость перемещения вытеснителя.

Таким образом, равенство

$$\left| \frac{dS_{\text{раб.н.}}}{d\alpha} \right| = \left| \frac{dS_{\text{выт}}}{d\alpha} \right|$$

является условием перехода от одного из четырех основных процессов цикла во внутреннем контуре к другому.

На рисунке 6 показаны графики перемещений и скоростей движения рабочего поршня и вытеснителя для экспериментального одноцилиндрового ДС вытеснительного типа со следующими конструктивными особенностями: радиус кривошипа – 14 мм; длина шатуна – 40 мм; дезаксиал – 15 мм; сдвиг фаз – $51^{\circ}20'$.

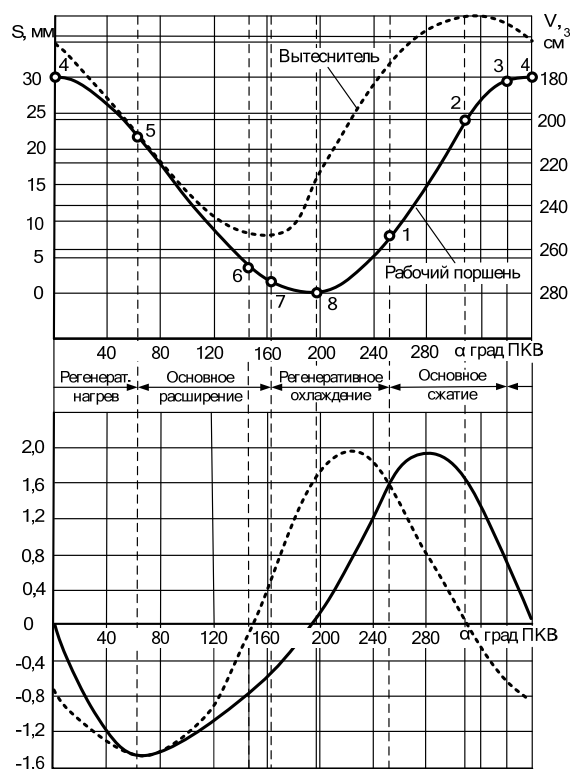


Рисунок 6 - Графики перемещения и скорости движения рабочего поршня и вытеснителя двигателя ДС 6,5/3,0

Как видно из рисунка, абсолютная величина скорости движения вытеснителя становится больше, чем у рабочего поршня за 16 град до прихода последнего в свою ВМТ (т. 3) и вновь сравнивается с ней через 63 град после ВМТ (т. 5). Следовательно, процесс регенеративного нагрева рабочего тела (участок

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ВО ВНУТРЕННЕМ КОНТУРЕ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА

диаграммы 3–4–5) длится 79 град ПКВ. Затем абсолютная величина скорости поршня становится больше, чем у вытеснителя – начинается процесс расширения с подводом теплоты к рабочему телу извне. Заканчивается он в т. 7 при угле поворота кривошипа 164 град от положения, соответствующего ВМТ поршня. Именно здесь скорость движения вытеснителя сравнивается со скоростью перемещения рабочего поршня. С этого момента начинается процесс регенеративного охлаждения, который длится 91 град ПКВ (до т. 1). После т. 1 поршень движется быстрее вытеснителя, происходит сжатие рабочего тела, сопровождающееся отводом от него теплоты вовне. Заканчивается этот процесс за 16 град до ВМТ после чего цикл повторяется.

Из рисунка хорошо видно, что процессы регенеративного теплообмена на диаграмме отображаются как минимум двумя политропами каждый. Одна политропа характеризует поведение рабочего тела до прихода поршня в НМТ или ВМТ, а вторая – после прохождения этих точек. Каждый из процессов внешнего теплообмена можно разделить на две политропы. Это связано с тем, что при сжатии рабочего тела поршнем вытеснитель движется вначале к своей ВМТ (т. 2), а затем от нее. В ходе расширения вытеснитель до т. 6 перемещается к своей НМТ, а затем от нее.

Таким образом, анализ процессов, совершающихся в ВК ДС с учетом кинематики рабочего поршня и вытеснителя, позволяет разделить линию индикаторной диаграммы на восемь участков. Первая фаза основного сжатия (участок 1–2) совершается при одновременном перемещении в сторону своих ВМТ и рабочего поршня и вытеснителя. В этот период времени скорость поршня выше, чем вытеснителя, что обуславливает сжатие газа, большая часть которого уже находится в холодной полости и еще продолжает в нее поступать. Вторая фаза основного сжатия (линия 2–3) совершается в условиях продолжающегося движения рабочего поршня к НМТ. Сжатие газа теперь происходит в условиях его переталкивания из холодной полости в горячую. Когда скорость перемещения вытеснителя сравнивается со скоростью поршня, основное сжатие заканчивается. Заключительное сжатие (линия 3–4) отображает начальную стадию регенеративного нагрева рабочего тела; предварительное расширение (линия 4–5) – завершающую стадию этого нагрева. Первая фаза основного расширения (линия – 5–6) протекает при одновременном перемещении в сторону своих НМТ и поршня и вытеснителя. Скорость перемещения первого больше, основная масса рабочего тела находится в горячей полости и продолжает увеличиваться за счет поступления его из холодной до прихода вытеснителя в свою НМТ (т. 6). Вторая фаза основного расширения (линия 6–7) совершается в условиях продолжающегося движения поршня к своей НМТ. Вытеснитель же в это время начинает перемещаться к ВМТ и перегонять нагревающийся газ из горячей полости в холодную. Линия 7–8 отображает на диаграмме первую стадию регенеративного охлаждения, которая совершается в условиях заключительного расширения газа. Предварительное сжатие (линия 8–1) соответствует завер-

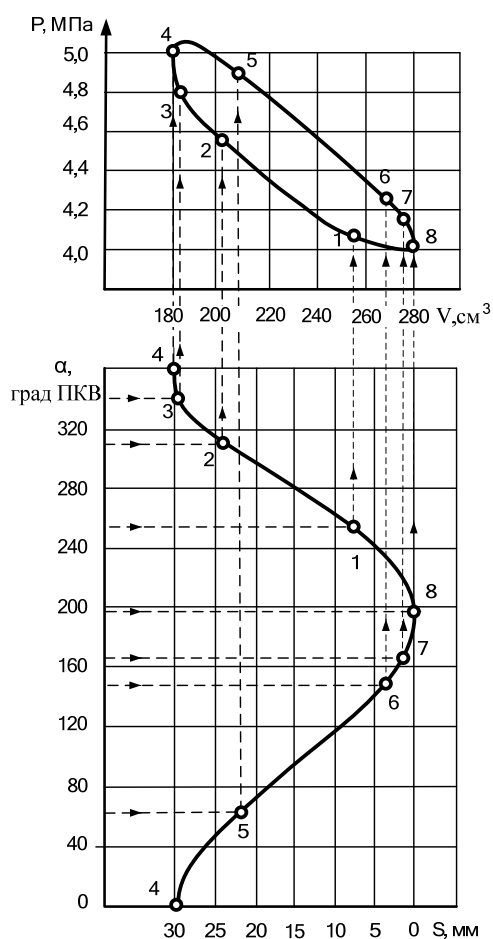


Рисунок 7 - Разделение индикаторной диаграммы на участки

На рисунке 7 показано расположение точек 1, 3, 5 и 7 на индикаторной диаграмме при работе экспериментального двигателя ($n = 1000 \text{ мин}^{-1}$).

шающей стадии регенеративного охлаждения.

Каждый из восьми перечисленных участков индикаторной диаграммы может быть аппроксимирован соответствующим политропным процессом. При этом следует подчеркнуть, что замена реальной диаграммы совокупностью политроп не несет в себе никаких элементов идеализации. При аппроксимации возникает лишь некоторое несовпадение действительной линии индикаторной диаграммы на каком-то ее участке с выбранной политропой. Однако, как показали наши исследования, несовпадение это может быть сведено к минимуму путем тщательного подбора показателей аппроксимирующих политроп.

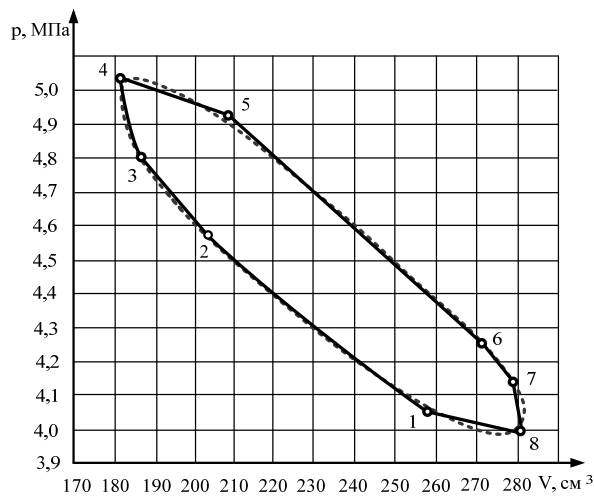


Рисунок 8 – Индикаторная диаграмма двигателя ДС 6,5/3,0 (-----) и ее аппроксимация восьмью политропными процессами

Рисунок 8 иллюстрирует замену восьмью политропными процессами индикаторной диаграммы, полученной при работе экспериментального ДС с размерностью 6,5/3,0 на скоростном режиме $n=1000 \text{ мин}^{-1}$.

Заключение

Как видно, совпадение реальной индикаторной диаграммы и ее аппроксимации восьмью политропными процессами достаточно хорошее, что позволяет использовать предложенную термодинамическую модель для исследования влияния различных факторов на показатели ДС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бундин, А.А. Термодинамический анализ цикла Стирлинга // Машиностроение (Изв. высш. учеб. заведений). – 1969. – № 12. – С. 106–109.
2. Ридер, Г. Двигатели Стирлинга / Г. Ридер, Ч. Хупер; пер. с англ. С.С. Ченцова, Е.Е. Черейского, В.И. Кабакова. – М.: Мир, 1986. – 464 с.
3. Rallis C. Optimum compression ratios of Stirling cycle machines / C. Rallis, I. Urielli // Univ. of Witwatersrand Dept. of mechanical Engineering, Report № 68 - 1976. – June. – P. 17–22.
4. Kolin I. The Evolution of the heat Engine / I. Kolin. – London: Longmans Press, 1972. – 97 p.
5. Евенко, В.И. Обобщенный термодинамический цикл двигателя Стирлинга // Двигателестроение. - 1979. – № 1. – С. 15–17.
6. Бойко, С.В. Комплексная оптимизация внутреннего контура двигателя с внешним подводом теплоты по эксергетическим характеристикам его элементов: Дис. ... канд. техн. наук / С.В. Бойко. – Л., 1983. – 186 с.
7. Коган, А.Я. Термодинамический анализ цикла двигателя Стирлинга / А.Я. Коган // Двигателестроение. – 1986. – № 2. – С. 3–6.

Кукис В.С., д.т.н., проф., Южно-Уральский ГУ, Челябинск, тел. 8(351)791-26-04, E-mail: idem37@mail.ru;
Сеначин П.К., д.т.н., проф., АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул, тел. 8(3852)26-05-16, E-mail: senachinpk@mail.ru;
Рыбалко А.И., ОАО «15 центральный авторемонтный завод», тел. 8(383)245-19-28, E-mail: info@carz15.ru.