

графики температуры, отражающие состояние рабочего тела в 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.

Отмеченная разница температур в различных полостях ДС в каждый момент времени при определении состояния газа ВК может быть скорректирована введением эквивалентной температуры [1]. В результате появляется возможность построения индикаторной диаграммы с некоторыми усредненными по ВК параметрами, считая состояния газа квазиравновесными.

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 в ВК 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 вовне).

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

$$\text{Таким образом, равенство } \left| \frac{dS_{\text{раб.т.}}}{d\alpha} \right| = \left| \frac{dS_{\text{выт.}}}{d\alpha} \right| \text{ яв-}$$

ляется условием перехода от одного из четырех основных процессов цикла в ВК к другому.

На рис. 1 показаны графики перемещений и скоростей движения рабочего поршня и вытеснителя для одноцилиндрового ДС вытеснительного типа со следующими конструктивными особенностями: радиус кривошипа - 14 мм; длина шатуна - 40 мм; дезаксиал - 15 мм; сдвиг фаз - $51^{\circ}20'$.

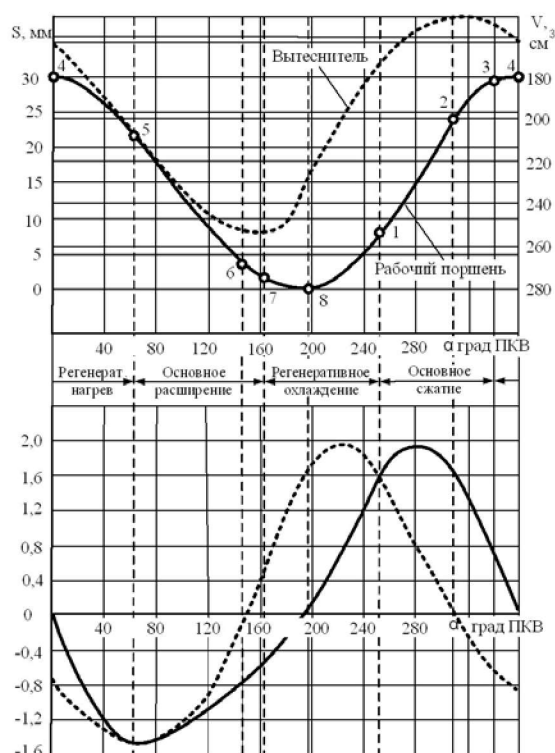


Рис. 1. Графики перемещения и скорости движения рабочего поршня и вытеснителя двигателя Стирлинга ДС 6,5/3,0

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 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.

На рис. 2 показано расположение точек 1, 3, 5 и 7 на индикаторной диаграмме при работе экспериментального двигателя ($n = 1000 \text{ мин}^{-1}$). 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. Нетрудно заметить также, что и 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.

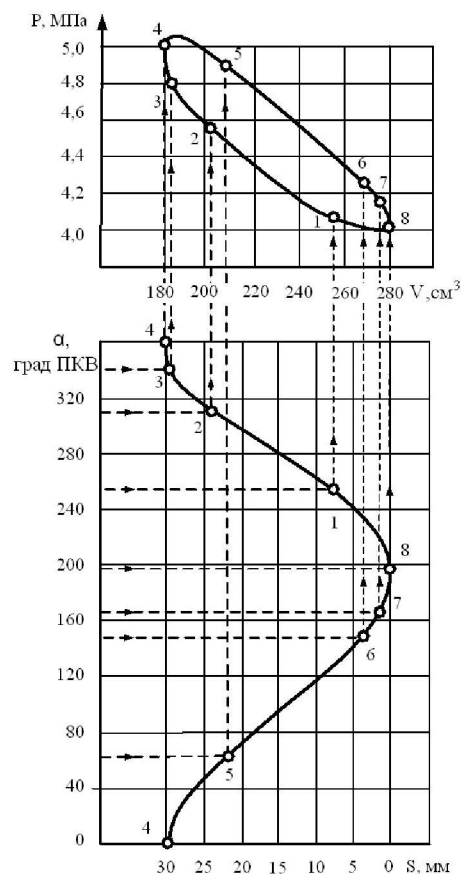


Рис. 2. Разделение индикаторной диаграммы на участки

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 со-

вершается в условиях заключительного расширения газа. Предварительное сжатие (линия 8-1) соответствует завершающей 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.

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

Оценка адекватности предложенной модели

Для получения представления о степени адекватности различных термодинамических моделей экспериментальным данным и оценки их применимости в инженерной деятельности сравним значения индикаторного КПД, полученные при аппроксимации ими реальной индикаторной диаграммы, приведенной в работе [2]. Диаграмма получена на режиме: частота вращения валов двигателя - 84 с^{-1} ; температура стенки горячей полости - 873 К ; температура стенки холодной полости - 292 К ; среднее давление цикла - 5 МПа ; КПД регенератора - $0,81$.

Результаты вычислений приведены в табл. 1, третий столбец которой содержит отклонения η_i от значения η_i , полученного в эксперименте, %.

Анализ материалов таблицы свидетельствует о том, что лучшие результаты присущи моделям, у которых не регламентирован характер составляющих цикл процессов. В этих случаях удается обеспечить достаточно адекватную замену линии реальной индикаторной диаграммы совокупностью политропных процессов. Как и следовало ожидать, увеличение количества участков диаграммы, аппроксимируемых политропами, повышает точность замены оригинала моделью. Так, уточненная термодинамическая модель (состоящая из восьми по-

литроп) дала ошибку 2 %. Использование шести-политропной модели увеличило ошибку до 3,3 %. Большая ошибка характерна для цикла Треска, в которой внешний теплообмен предполагается протекающим изотермично, но процессы регенерации, включающие по два «жестко» регламентированных участка - изохорный и изобарный - все-таки ближе к реальной диаграмме, чем один изохорный. Характерной особенностью аппроксимации экспериментальной диаграммы рассмотренными выше циклами является меньшее значение η_i , чем в действительности. Это объясняется тем, что цикловая работа во всех случаях одинакова, а количество подведенной теплоты при замене плавной кривой диаграммы ломаными линиями несколько увеличивается, что и приводит к соответствующему уменьшению КПД. Близок по ошибке к рассмотренным моделям и цикл Стирлинга. Но предполагаемая в нем полная регенерация уменьшает потребность в количестве подводимой извне теплоты (при той же полезной работе), что, естественно, сказывается на КПД. Он увеличивается, и расчетное значение η_i становится выше фактического. Особое место в ряду термодинамических моделей занимают циклы, включающие адиабатные процессы. Они меньше всего пригодны для аппроксимации реальной диаграммы. Это связано с тем, что в таких циклах полностью (псевдоцикл Стирлинга, регенеративный цикл Отто) или почти полностью (цикл Рейллиса) исключается внешний теплообмен в процессах сжатия и расширения, что совершенно не соответствует действительности. Лучшим в этой группе моделей является цикл Рейллиса, составленный из шести участков.

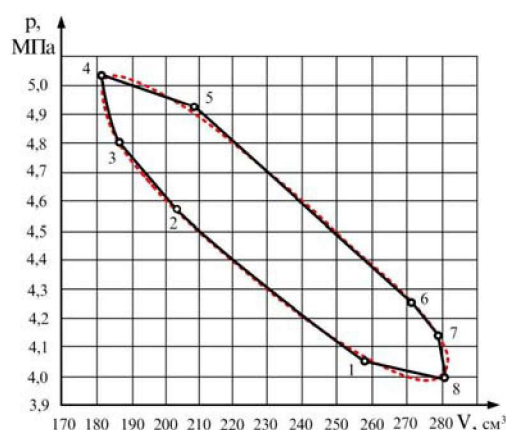


Рис. 3. Индикаторная диаграмма двигателя Стирлинга ДС 6,5/3,0 при $n=1000 \text{ мин}^{-1}$ (пунктирная линия), и ее аппроксимация восемью политропными процессами

Таблица 1. Значения индикаторного КПД при различных вариантах аппроксимации индикаторной диаграммы

Модель цикла	η_i , %	Погрешность, %
Результаты испытаний	30,2	–
Цикл Стирлинга	32,8	+8,6
Цикл Стирлинга с учетом неполноты регенерации	25,9	-14,6
Регенеративный цикл Отто [3]	49,8	+64,6
Цикл с изохорной регенерацией и политропными процессами внешнего теплообмена [4]	28,7	-5,0
Псевдоцикл Стирлина [5]	49,8	+64,6
Цикл Треска [5]	26,3	-12,9
Цикл Рейллиса [5]	45,2	+49,7
Обобщенный цикл [6]	29,2	-3,3
Уточненная модель цикла	29,6	-2,0

Заключение

Как следует из материалов статьи, предложенная термодинамическая модель (состоящая из

восьми политроп) позволяет с наименьшей ошибкой отражать энергетические явления, протекающие во внутреннем контуре двигателя Стирлинга, и открывает возможность использования для исследования реальной энергетической картины процессов современного мощного термодинамического аппарата.

Список литературы:

1. Двигатели Стирлинга / В.Н. Даниличев [и др.]; под ред. М.Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1977. – 150 с.
2. Бойко С.В. Комплексная оптимизация внутреннего контура двигателя с внешним подводом теплоты по эксергетическим характеристикам его элементов: Дис. ... канд. Техн. Наук. – Л., 1983. – 186 с.
3. 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.
4. Бундин А.А. Термодинамический анализ цикла Стирлинга // Машиностроение (Изв. высш. учеб. заведений). – 1969. – № 12. – С. 106–109.
5. 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.
6. Евенко В.И. Обобщенный термодинамический цикл двигателя Стирлинга / В.И. Евенко // Двигателестроение. - 1979. – № 1. – С. 15–17.

УДК 621.43.013

В.А. Корогодский, канд. техн. наук, А.О. Хандримайлов, канд. техн. наук, Є.С. Грайворонський, асп.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ МАСО – І ТЕПЛОБМІНУ У ПАЛИВНОМУ СТРУМЕНИ З ПЕРИФЕРІЙНИМ РОЗПОДІЛЕННЯМ ПАЛИВА

Актуальність проблеми. Підвищення паливної економічності та зниження кількості викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами у двигунах з іскровим запалювання (ІЗ) можливо при застосуванні безпосереднього вприскування палива (БВП). Для покращення показників двигуна, ефективності протікання процесів згоряння необхідно удосконалити процеси сумішоутворення. Тому проведення досліджень процесів масо – і теплообміну в паливному струмені являється актуальною проблемою при організації внутрішнього сумішоутворення.

Аналіз публікацій. Заслуговує на увагу модель процесів масо – і теплообміну в паливному струмені на базі теорії аеродинамічного сліду, яку запропонував Петриченко Р.М. [1]. В моделі враховується взаємодія крапель при русі струменя. Але модель для дослідження процесів сумішоутворення використовувалася стосовно дизельних двигунів,

що відрізняється від умов протікання процесів внутрішнього сумішоутворення у двигунах з ІЗ та БВП.

На двигуні з ІЗ та БВП були проведені дослідження процесів масо – і теплообміну у паливному струмені на основі теорії аеродинамічного сліду при формуванні суцільного фронту в струмені [2]. Але при розробці нового способу організації робочого процесу з БВП [3] застосовується паливний струмінь з периферійним розподіленням палива. Тому необхідно уточнити математичну модель та провести дослідження процесів масо – і теплообміну у паливному струмені з порожниною усередині.

Паливний конусоподібний струмінь направляє таким чином, щоб міжелектродний проміжок свічки запалювання знаходився усередині конусоподібної порожнини струменя, що дозволяє запобігти шунтуванню міжелектродного проміжку свічки запалювання.