

DOI: 10.26104/NNTIK.2022.45.68.007

Турсунбаев Ж.Ж.

КҮН ЭНЕРГИЯСЫНАН ИШТӨӨЧҮ КЫЙМЫЛДАТКЫЧТАРДЫ
ТЕОРИЯЛЫК ИЗИЛДӨӨ

Турсунбаев Ж.Ж.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ
РАБОТАЮЩИХ ОТ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Zh. Tursunbaev

THEORETICAL STUDY OF ENGINES SOLAR POWERED

УДК: 662.997.534

Шмидт теориясынын негизинде машиналарды эсептөө ыкмалары математикалык жактан жөнөкөй жана иллюстрациялуу, бирок алар жылуулук алмаштыргычтарды жана регенераторду тандоого жана оптималдаштырууга мүмкүндүк бербейт. Машиналардагы реалдуу процесстерди көбүрөөк эсепке алган эсептөө методдору өтө татаал жана түйшүктүү жана инженердик эсептөөлөр үчүн анча ылайыктуу эмес. Бул жагдайлар Стирлинг циклинде иштеген машиналарды иштеп чыгууга бир кыйла кедергисин тийгизет жана алардагы реалдуу процесстерди эсепке алуу жана жылуулук алмашуу агрегаттарын оптималдаштырууга мүмкүндүк берүү менен бул машиналарды эсептөөнүн инженердик методун түзүү проблемасын күн тартибине коюуда. Биздин изилдөөлөрүбүз көрсөткөндөй, Стирлинг кыймылдаткычтарынан электр станциясынын чыгуу параметрлерин эң так талдоо үчүн күн энергиясын концентраторлордун оптикалык эффективдүүлүгүн жана башка параметрлерин эсептөө жана энергияны эсептөөнүн рационалдуу ыкмаларын колдонуу маанилүү роль ойнойт. Стирлинг кыймылдаткычтарынын меш-куруучу аппарат-жылуулукту кабыл алуучу системасы. Ошондуктан, биз керектөөчүлөрдү электр жана жылуулук энергиясы менен камсыз кылуу үчүн энергиянын кайра жаралуучу түрлөрүн колдонуу менен жакшыртылган технологиялык көрсөткүчтөрү бар Стирлинг кыймылдаткычы бар автономдуу электр станциясын иштеп чыктык.

Негизги сөздөр: машиналар, эсептөөнүн инженердик ыкмасы, автономдуу электр станциясы, жылуулук менен камсыздоо, Стирлинг кыймылдаткычтары.

Методики расчета машин, основанных на теории Шмидта, являются математически простыми и наглядными, однако они не позволяют произвести выбор и оптимизацию теплообменников и регенератора. Расчетные же методики, в большей мере учитывающие реальные процессы в машинах, слишком сложны и громоздки, и мало пригодны для инженерных расчетов. Эти обстоятельства в значительной мере сдерживают развитие машин, работающих по циклу Стирлинга, и ставят на повестку дня проблему создания инженерной методики расчета этих машин, учитывающие реальные процессы в них и позволяющие оптимизировать теплообменные узлы. Проведенные нами исследования показали, что для наиболее точного анализа выходных параметров энергетической установки с двигателями Стирлинга большую роль играет расчет оптической эффективности и других параметров концентраторов солнечной энергии и применение рациональных методов расчета системы топочно-горелочное устройство-теплоприемник двигателей Стирлинга. Поэтому нами разработана автономная энергетическая установка с двигателем Стирлинга с улучшенными технологическими показателями на возобновляе-

мых видах энергии для обеспечения потребителей электрической и тепловой энергией.

Ключевые слова: машин, инженерная методика расчета, автономная энергетическая установка, теплоснабжение, двигатели Стирлинга.

Methods for calculating machines based on the Schmidt theory are mathematically simple and illustrative, but they do not allow the selection and optimization of heat exchangers and the regenerator. The calculation methods, which take into account real processes in machines to a greater extent, are too complex and cumbersome and are not very suitable for engineering calculations. These circumstances largely hinder the development of machines operating on the Stirling cycle, and put on the agenda the problem of creating an engineering method for calculating these machines, taking into account real processes in them and allowing to optimize heat exchange units. Our studies have shown that for the most accurate analysis of the output parameters of a power plant from Sterling engines, an important role is played by the calculation of the optical efficiency and other parameters of solar energy concentrators and the use of rational methods for calculating the system of the furnace-burner device-heat receiver of Stirling engines. Therefore, we have developed an autonomous power plant with a Stirling engine with improved technological performance using renewable types of energy to provide consumers with electrical and thermal energy.

Key words: machines, engineering method of calculation, autonomous power plant, heat supply, Stirling engines.

Введение. В Кыргызстане в положениях энергетической программы республики на длительную перспективу, предусмотрено существенное расширение и освоение возобновляемых источников энергии, в том числе солнечной энергии для нужд населения. Важное место в этих работах занимает вопрос энерго-снабжения отдельных объектов, удаленных от энергосетей.

Разработка и создание автоматизированных энерго-установок на базе динамических преобразователей энергии является перспективным направлением для природно-климатического условия Кыргызской Республики, где среднегодовая солнечная сияние составляет 210 дней. Кроме того, в Республике имеются многочисленные фермерские хозяйства, содержащие крупный и мелкий скот на использование отходов которых, специально устанавливаются биогазовые установки.

Республика Кыргызстан является горной страной, в которой имеются населенные пункты, располо-

женные в труднодоступных горных местностях. Большинство этих поселений не обеспечены электроэнергией, но имеют благоприятные условия (горные речки, ветер, солнце, отходы животных и т.д.) для внедрения автоматизированных энерго-установок любого вида. Поэтому разработка автоматизированных энерго-установок с двигателем Стирлинга работающей на возобновляемых видах энергии для выработки тепловой и электрической энергии для использования жителями отдаленных районов Республики является актуальной.

Методика исследований: построение рабочей гипотезы, теоретическое обоснование предложений и последующая разработка ряда следствий, вытекающих из этих предложений.

Результаты анализа и исследований. Двигатель, работающий от солнечной энергии – это неиссякаемый, но в то же время нерегулярный источник энергии, который в последнее время вновь привлек внимание исследователей, использующих для самых различных его применений различные устройства. Обычно конечной целью является выработка электрической энергии, которую можно использовать разными способами, даже в пилотируемом космическом полете. Солнечной энергией нагревают воду, которую затем можно использовать в системах теплоснабжения или в виде пара непосредственно для привода паровой турбины (цикл Ренкина).

Метод Шмидта [1] составляет основу большинства теоретических исследований двигателей. Шмидт с учетом ряда допущений получил простое уравнение, определяющее передаваемую теплоту и производимую работу, за цикл в зависимости от некоторых параметров двигателя.

$$Q = L = \int P \cdot dV, \quad (1)$$

В своих расчетах он по общеизвестным формулам определял изменение объемов в полости сжатия и расширения, изменения давления соответствующих объемов и на основе уравнения Менделеева-Клапейрона определял массу рабочего тела в ДС.

Впоследствии ряд исследователей, основываясь на теории Шмидта, выполнили работу по анализу цикла Стирлинга [2,3]. В них ими исследовались двигатель и холодильная машина, работающие по модифицированным циклам Стирлинга.

К 60-годам прошлого столетия были разработаны несколько разновидностей двигателей Стирлинга. Наиболее точное описание математической модели рабочего процесса проведены в работе [4]. В этой работе Финкельштейном осуществлен узловый метод анализа цикла Стирлинга применительно на три модификации двигателей Стирлинга (α , β и γ - модификаций). В ней работа за цикл определяется суммой интегралов по горячей и холодной полостям и выражается в следующем виде:

$$L_{ц} = \pi \cdot (1 - \tau) \cdot P_{MAX} \cdot V_1 \cdot \frac{\sqrt{1-\xi}}{\sqrt{1+\xi}} \cdot \frac{\xi}{1+\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \sin \theta, \quad (2)$$

где: P_{max} - значение максимального давления в цикле; V_1 - объем, описываемый вытеснителем; $\tau=T_x/T_g$ – отношение температур в холодной и в горячей зонах; $K=V_2/V_1$ - отношение описываемых объемов; $X=V_m/V_1$ – относительный мертвый объем.

Для двигателя α - модификации:

$$\xi = \frac{\sqrt{\tau + K^2 + 2 \cdot \tau \cdot K \cdot \cos \alpha}}{\tau + K + \frac{4 \cdot X \cdot \tau}{1 + \tau}}, \quad (3)$$

$$\sin \theta = \frac{K \cdot \sin \alpha}{\sqrt{K^2 + (\tau - 1)^2 + 2 \cdot K (\tau - 1) \cdot \cos \alpha}}, \quad (4)$$

Для двигателя β - модификации:

$$\xi = \frac{\sqrt{K^2 + (\tau - 1)^2 + 2 \cdot K \cdot (\tau - 1) \cdot \cos \alpha}}{\tau + \frac{4 \cdot X \cdot \tau}{1 + \tau} + \sqrt{K^2 + 1 - 2 \cdot K \cdot \cos \alpha}}, \quad (5)$$

$$\sin \theta = \frac{K \cdot \sin \alpha}{\sqrt{K^2 + (\tau - 1)^2 + 2 \cdot K (\tau - 1) \cdot \cos \alpha}}, \quad (6)$$

Для двигателя γ - модификации:

$$\xi = \frac{\sqrt{K^2 - (\tau - 1)^2 + 2 \cdot K \cdot (\tau - 1) \cdot \cos \alpha}}{\tau + K + 1 + \frac{4 \cdot X \cdot \tau}{1 + \tau}}, \quad (7)$$

$$\sin \theta = \frac{K \cdot \sin \alpha}{\sqrt{K^2 + (\tau - 1)^2 + 2 \cdot K (\tau - 1) \cdot \cos \alpha}}, \quad (8)$$

Для сравнения различных модификаций был принят критерий оптимизации Z

$$Z = \frac{L_{Ц}}{V_T \cdot P_{MAX}}, \quad (9)$$

где: V_T – полный рабочий объем.

Результаты расчетов, проведенных на ЭВМ по переменным K , α , X и τ показали, что наибольшим значением параметра мощности обладает двигатель α - модификации.

Это объясняется размещением вытеснителя и рабочего поршня в одном цилиндре и лучшим использованием рабочего объема в связи с перекрытием ходов поршней. Данная методика позволяет по определенным значениям X и τ найти оптимальные значения параметров K и α , а также оценить работу за цикл.

Для решения полученных выше уравнений была составлена программа для ЭВМ, позволяющая получать мгновенные значения температур, давлений и расхода газа в различных узлах, а из выходных параметров – мощность, к.п.д. и др. Вместе с тем, следует отметить, что методика Финкельштейна отличается громоздкостью и весьма сложна, что ограничивает ее

применимость в инженерных расчетах.

Кроме того, оставлен открытым вопрос о выборе соответствующих коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления, которые меняются в течении цикла в довольно больших пределах.

В работах [5-9] рассматриваются двигатели Стирлинга, используемого как термотрансформатор. Рал и Квейл [10], используя работы Йендалла и Хагена [7,8] вывели аналитические выражения для характеристик идеализированного цикла термотрансформатора.

Как показывает анализ, проведенный в [11], при работе термотрансформатора без потерь, в предположении изотермичности процесса сжатия и расширения газа в рабочих полостях, соотношение между работой сжатия и расширения можно характеризовать при помощи коэффициента K , равного отношению получаемой работы в цикле к работе сжатия.

$$K = \frac{l_{\Gamma} + l_X}{l_C} = \frac{q_{\Gamma} + q_X}{q_C}, \quad (10)$$

В случае равенства этих работ, что имеет место в термотрансформаторе, $K=1$. Из идеализированного анализа рабочего процесса машины получены уравнения для подсчета работы по полостям.

$$l_C = q_C = \oint P \cdot d \cdot \bar{V}_C = \frac{\pi \cdot n}{60} \cdot \bar{P} \cdot V_K \cdot \frac{\delta}{1 + \sqrt{1 - \delta^2}} \cdot \sin \theta, \quad (11)$$

$$l_{\Gamma} = q_{\Gamma} = \oint P \cdot d \cdot \bar{V}_{\Gamma} = \frac{\pi \cdot n}{60} \cdot \bar{P} \cdot V_K \cdot N \cdot \frac{\delta}{1 + \sqrt{1 - \delta^2}} \cdot \sin(\theta - \varphi_1), \quad (12)$$

$$l_X = q_X = \oint P \cdot d \cdot \bar{V}_X = \frac{\pi \cdot n}{60} \cdot \bar{P} \cdot V_K \cdot \omega \cdot \frac{\delta}{1 + \sqrt{1 - \delta^2}} \cdot \sin(\theta - \varphi_2), \quad (13)$$

где: P – функция изменения давления в цикле; \bar{P} – среднее давление в цикле;

\bar{V}_c – текущий объем полости сжатия; \bar{V}_r – текущий объем горячей полости;

\bar{V}_x – текущий объем холодной полости; V_K – объем картера; n – число циклов в минуту; δ – параметр, характеризующий степень сжатия; θ – угол сдвига фаз между максимальным значением объема сжатия и минимальным значением давления; φ_1 – угол сдвига фаз, изменения объемов горячей полости и полости сжатия; φ_2 – угол сдвига фаз изменение объемов холодной полости и полости сжатия; N – отношение максимальных значений объемов горячей и полости сжатия; ω – отношение максимальных значений объемов холодной полости и полости сжатия.

В частных случаях при $N=0$ приведенные уравнения справедливы для холодной машины, а при $\omega=0$ – для теплового двигателя.

В работах [12,13] была сделана попытка, применить методы термодинамики тела переменной массы [14] для анализа процессов в тепловых машинах, работающих по циклу Стирлинга. Полученные расчетные методики позволяют вычислить отдельные параметры цикла, например, температуру и давление в рабочих полостях двигателя, а также характеристики теплоподвода в изотермической модели ДС. Результаты расчетов, приведенные в этих работах, показывают, что температура газа в полостях цилиндра и коэффициенты теплоотдачи в теплообменниках значительно меняются в течении цикла, а индикаторные диаграммы полостей отличаются от вычисленных по теории Шмидта. Следует отметить, что предлагаемые авторами [12,13] расчетные методики являются довольно громоздкими и, подобно теории Шмидта, не учитывают теплообмена и гидравлических потерь в цикле, что не позволяют оптимизировать теплообменники.

Учитывая громоздкость методики Финкельштейна, Кирклей [15] предпринял попытку упростить ее путем замены всех теплообменников двумя условными объемами с эквивалентным потоком газа. Но этот прием не дал желаемых результатов в плане упрощения, так как для распределения масс, в двигателе было получено восемь групп дифференциальных уравнений по четыре в каждой, а скачкообразное изменение параметров газа на границе между условными объемами отрицательно сказывается на точности расчета. В странах СНГ также ведется теоретические и экспериментальные работы по исследованию двигателя Стирлинга, как в целом [16,17]. Особое внимание при этом уделяется разработке и совершенствованию расчетных методик.

В работе [18,19] с целью упрощения расчетов

применен другой подход. Сущность метода заключается в том, что сначала рассчитывается основная характеристика, а затем вводятся поправки на конечные величины теплоотдачи и потери на трения. Основная характеристика ДС основывается в этом случае на следующих предпосылках: цилиндры адиабатные, нет потерь на трение в потоке, отсутствуют температурные градиенты при теплопередаче, масса газа и давление в полостях меняются синусоидально. Этот прием значительно усложняет методику расчета по сравнению с методикой Шмидта.

При этом вводятся дополнительные упрощающие допущения об изменении масс газа и давления по синусоидам, что, по-видимому, не повышает точность расчетов.

Значительный вклад в развитие теоретического анализа адиабатного цикла внесли Квейл и Смит [20], а также Риас и Смит [21], которые независимо один от другого оценили эффекты необратимости. Это позволило провести изучение некоторых вопросов теплообмена методом последовательных приближений с требуемой степенью точности.

Теоретические работы по рассматриваемому вопросу фирмы «Филипс», до настоящего времени опубликованы очень мало. В имеющихся публикациях упоминается о широком использовании ЭВМ и его способности оценить действительные характеристики двигателей с точностью 1-2%.

Термодинамическая моделирующая программа фирмы «Филипс» близка к той, которая ранее была выполнена Смитом. Она построена на основе адиабатного цикла Финкельштейна, рассчитываемого с последовательными приближениями и поправками.

Косвенное подтверждение использования фирмой «Филипс» адиабатного цикла с последующими дополнительными поправками можно найти в опубликованной в 1973 г. статье Фейера о влиянии фазового угла α на выходную мощность и к.п.д. двигателя Стирлинга [22]. В качестве определяющих параметров Фейером были выбраны параметры одноцилиндрового двигателя Стирлинга, изготовленного фирмой MAN/MWM, экспериментальные и расчетные характеристики которого находились в полном соответствии.

В работах [23-25] приведена методика расчета конструктивных параметров теплообменников двигателя Стирлинга, основанная на термодинамической модели. Для вышеуказанной термодинамической модели с принятыми упрощающими допущениями была составлена математическая модель для расчетов индикаторного к.п.д. и мощности двигателя с различными сочетаниями конструктивных и термодинамических параметров. Но точность расчета данной методики еще не высока, и надо ожидать, что она будет совершенствоваться по мере накопления экспериментального материала.

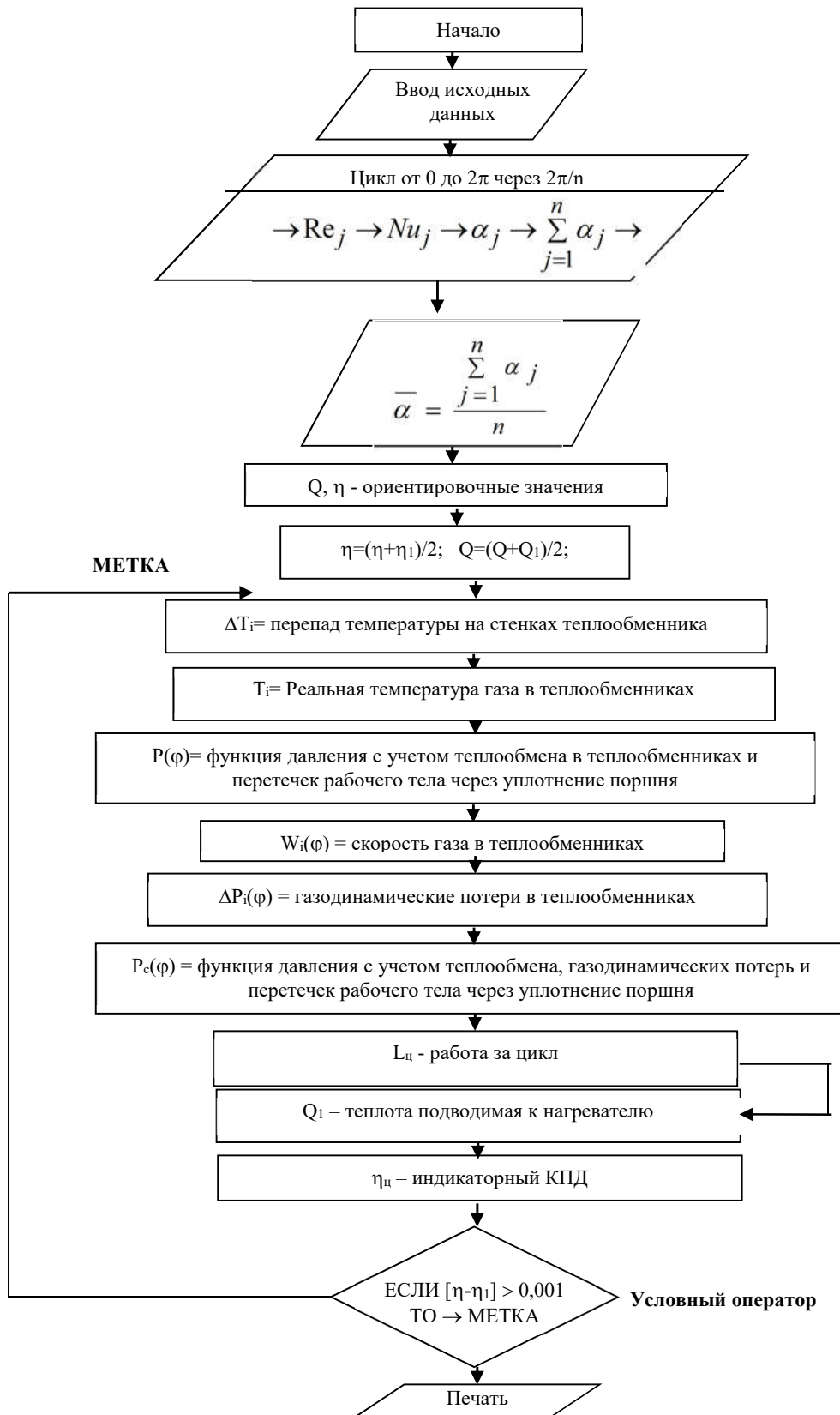


Рис. 1. Блок схема расчета основных параметров ДС на ЭВМ (программирования на языке Visual Basic).

Методики расчета машин, работающих по циклу Стирлинга, основанные на теории Шмидта [1, 26] являются математически простыми и наглядными, однако они не позволяют произвести выбор и оптимизацию теплообменников и регенератора. Расчетные же методики [19, 27] в большей мере учитывающие реальные процессы в машинах, работающих по циклу Стирлинга, слишком сложны и громоздки, и мало пригодны для инженерных расчетов.

Эти обстоятельства в значительной мере сдерживало развитие машин, работающих по циклу Стирлинга, и ставят на повестку дня проблему создания инженерной методики расчета этих машин, учитывающие реальные процессы в них и позволяющие оптимизировать теплообменные узлы.

В связи с этим нами разработана математическая модель и пакет прикладных программ на языке Визуал-Бейсик для практической реализации расчета параметров внутреннего контура ДС по разработанной математической модели (рис. 1).

Выводы:

1. Разработана математическая модель и пакет прикладных программ для её расчета позволяющие с более высокой точностью определять значения параметров внутреннего контура ДС АЭУ;

2. Разработанная математическая модель учитывает в расчетах наличие газодинамических сопротивлений в тракте теплообменников и утечек рабочего тела из над поршневых полостей в картер, и тем самым позволяет при проведении теоретических исследований более точно определить значения параметров внутреннего контура ДС АЭУ.

Литература:

- Schmidt G. Theory der geschlossenen calorischen Maschine von laubrou und Schwrtzkopf in Berlin. Z. Ver. Oster, 79. 1861.
- Работы по усовершенствованию конструкции двигателя, работающего по циклу Стирлинга / Экспресс-информация ВИНТИ, ПГД. 1997. - №22. - 250 с.
- Кузнецов Б.Г., Архаров А.М. Методы определения непрерывно изменяющихся температур в рабочих полостях идеальных прототипов газовых холодильных машин, работающих по циклу Стирлинга: Труды МВТУ им. Баумана. - 1970. - №138. - С. 90-97.
- Кузнецов Б.Г. и др. Анализ тепловой машины, работающей по совмещенному прямому и обратному циклу Стирлинга. Глубокий холод и кондиционирование: Труды МВТУ им. Баумана. - М. - №138. - 1970. - С. 124-131.
- Finkelstein T. Generalized thermodynamic analysis of Stirling engine / Sae Annual Meeting, Detroit. January 1960. - p. 1-27.
- Архаров А.М., Бондаренко Л.С. Теоретический анализ цикла идеального прототипа машины Такониса с тремя тепловыми источниками: Труды МВТУ им. Баумана. - №132. - 1969. - С. 120-129.
- Архаров А.М., Бондаренко Л.С., Кузнецов Б.Г. Анализ компоновочных схем криогенераторов, работающих без затрат механической работы: Труды МВТУ им. Баумана. - №138. - 1970. - С.12-20.
- Chellis F., Hogan W. Adv. Cry. Eng. 1969. v.9. - p. 545-551.
- Yendall E.F. Adv. Cry. Eng. 1960. V.2. - P. 188-196.
- Суслов А.Д., Белов В.В. – Машиностроение. -№3. - 1971. - С. 99-103.
- Rule T., Qwale E. Adv. Cry. Eng. 1969. V.14. - P. 343-352.
- Кузнецов Б.Г. и др. Анализ тепловой машины, работающей по совмещенному прямому и обратному циклу Стирлинга. Глубокий холод и кондиционирования: Труды МВТУ им. Баумана. - М., -№138. - 1970. - с. 97-105.
- Finkelstein T. Cycle process in closed regenerative gas machines analyzed by a computer simulating a differential analyzer // Journal of engineering for industry. Febr. 1962. - p.186 -202.
- Мельцнер Л., Караванский И. Исследования идеального цикла машины Филиппа методами термодинамики переменного количества газа. – Холод. техн. №5. 1959. - 72 с.
- Кузнецов Б.Г., Архаров А.М. Метод определения непрерывно изменяющихся температур в рабочих полостях идеальных прототипов газовых холодильных машин, работающих по циклу Стирлинга: Труды МВТУ им. Баумана. - №138. - 1970. - С. 45-52.
- М.А. Мамонтов. Вопросы термодинамики тела переменной массы. – Оборонгиз. 1961. - 121 с.
- Звонов В.А., Даниличев В.Н. Исследование термодинамического цикла двигателя Стирлинга. - Харьков: изд. ХГУ, №32. - С.121.
- Бобенко Е.А. Исследование Теплоотдачи сетчатых регенераторов холодильных машин: Автореф. канд. дисс. техн. наук. 1973. - 19 с.
- Sharver W.W., Daff W.S. Solar thermal electric power systems composition of lin-focus collectors // Solar Energy. Vol. 22. - P. 49-61.
- Qvale E.B., Smith J.L. A mathematical model for steady operation of Stirling-type engines // Jr. Journal of Engineering for power. January, - 1968.
- Qvale E.B., Smith J.L. Jr. (1969). An approximate solution for the thermal performance of a Stirling engine regenerator // J. Engng Pwr (ASME), 91. - P. 109-112.
- Rios P.A., Smith J. L. Jr. (1969). An analytical and experimental evaluation of the pressure-drop losses in the Stirling cycle // ASME Paper No. 69-WA/Ener-8, Vol. 92. Ser. A. No.2. April. - p.182-188.
- Криогенные газовые машины / Суслов А.Д., Гороховский Г.А., Полтараус В.Б., Горшков А.М. - М.: «Машиностроение», 1982. - 214 с.
- Feurer B. Degrees of freedom in the layout of Stirling engines // Von Karman Inst. For Fluid Dynamics, Lecture Series 53, Feb. 12-16. - P. 58. - P.12-23.
- Умаров Г.Я., Трухов В.С., Турсунбаев И.А., Орунов Б.Б. Методика оптимизации теплообменников двигателя Стирлинга // Гелиотехника, - 1976. - №6. - С.18-23.
- Шевич Ю.А., Микулин Е.И. Теплообмен и сопротивление в сетчатом теплообменнике-рекуператоре. - Химическое и нефтяное машиностроение. - №6. 1973. - 452 с.
- Schmidt G. Theory der geschlossenen Lehmschen Maschine // Z. Ver. desch. Ing. - №1. January. - 1871. v. 15. - p.10-15.
- Добаева Г.К., Абдурасулова А.И. Экономическая эффективность внедрения новой техники в системе водоснабжения. / Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2010. - №. 7. - С. 138-139
- Темирбаев К.Т., Бабеков А.У., Макеева М.Ж. Электр учкундук дисперстөө методу менен синтезделген Al-Cu системасынын наноккомпозитинин кычкылдануусу. / Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. - 2020. - №. 11. - С. 55-58.