

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКИ ИНЕРЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Е.Ф. Бахвалова<sup>1</sup>, С.О. Некрасова<sup>1</sup>, Д.В. Нистоцкий<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский университет, г. Самара, Российская Федерация, [evgeniya-bahvalova@yandex.ru](mailto:evgeniya-bahvalova@yandex.ru)

*Ключевые слова: тепловой двигатель, термодинамика переменной массы, пульсационная труба, регенератор, цикл Стирлинга*

Двигатели с внешним подводом теплоты привлекают большое внимание в последние десятилетия. Это связано с тем, что они могут преобразовывать тепло из различных источников (низкосортные промышленные отходы тепла, солнечная энергия, избыточное тепло в микросистемных системах и др.) Наиболее распространенным типом является двигатель Стирлинга, который использует механическую приводную связь с вытеснителем и силовым поршнем, усовершенствованной конструкцией является свободнопоршневой двигатель Стирлинга (FPSE). [1]. В последние десятилетия наблюдается интерес к двигателям с пульсационной трубой (ДПТ) как к отдельному классу тепловых машин с внешним подводом теплоты, конструкция которых, в отличие от ТАД, характеризуется отсутствием больших контуров-резонаторов. Рабочий процесс ДПТ основан на термической инерции при участии термоакустических эффектов возбуждения колебательного процесса. Конструкция двигателя с пульсационной трубой аналогична криоохлаждателям и характеризуется наличием пульсационной трубы между холодной и горячей зонами отвода и подвода теплоты. Двигатели с пульсационной трубой, как конструктивно простые и дешевые устройства, характеризуются также возможностями реализации прямого и обратного циклов.

В представленной работе рассмотрен двигатель с пульсационной трубой, имеет зону подвода (горячий теплообменник и регенератор) и отвода теплоты, разделенных пульсационной трубой, холодный теплообменник в регенераторе, свободный поршень, который выполняет двойную роль движителя рабочего тела и имитации нагрузки.

В работе приведено описание математической модели ДПТ и представлены результаты моделирования установившегося режима работы в программе для расчета свободнопоршневых двигателей Стирлинга [3, 4]. Показано, что 30..33 % массы рабочего тела, находящегося в пульсационной трубе, не участвует в цикле при производстве полезной работы. Проведена оценка регенеративного процесса, который заключается в том, что газовый поток в пульсационной трубе в возвратно-поступательном движении проходит между двумя поверхностями с температурным градиентом в направлении потока. С помощью конечно-элементной модели Fluent рассмотрена динамика течения в двигателе с пульсационной трубой, подтверждено, что ядро потока не перемещается, а служит для «челночной теплопередачи» или «пожарной цепочки». Данный объем рабочего тела, называемый «регенеративным кольцом», не может считаться в полной мере мертвым объемом ДПТ. Мертвый объем в двигателе Стирлинга имеет тенденцию быть небольшим – особенно при коаксиальной или бета-конфигурации. С помощью разработанной конечно-элементной модели двигателя произведена оценка при каких условиях газовые объемы из холодной полости сжатия переменного объема пересекают всю длину регенеративного кольца, чтобы войти в горячую полость на противоположном конце. Определение объема газа, который никогда не достигает – не говоря уже о прохождении – регенератора позволяет определить возможность использования моделей термодинамики переменной массы аналогичных используемым для двигателей Стирлинга бета-конфигурации.

Произведенное CFD моделирование позволяет сделать выводы о факторах, определяющих концептуально рабочий процесс ДПТ.

### Список литературы

1. De Waele A., Liang W. Basic dynamics of split Stirling refrigerators // *Cryogenics*. 2008. V.48. P.417-425
2. A.I. Dovgyallo, S.O. Nekrasova, E.F. Bahvalova Investigation of a piston mass impact on the pulse tube engine performance using analytical and experimental methods. – *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2020. – V.21. – p.100684.
3. Organ, A.J. The air engine : stirling cycle power for a sustainable future / Organ, Allan J. – Cambridge : Woodhead [u.a.], 2007. – 278 с.
4. Rogdakis E.D., Bormpilas N.A., Koniakos I.K. A thermodynamic study for the optimization of stable operation of free piston Stirling engines // *Energy Conversion and Management*. 2004. V.45(4). P.575-593.

#### Сведения об авторах

Бахвалова Евгения Федоровна Аспирант Самарского национального исследовательского университета им. академика С.П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, e-mail: [evgeniya--bahvalova@yandex.ru](mailto:evgeniya--bahvalova@yandex.ru). Область научных интересов: моделирование тепловых двигателей

Некрасова Светлана Олеговна Канд. техн. наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета им. академика С.П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, e-mail: [yhoji@yandex.ru](mailto:yhoji@yandex.ru). Область научных интересов: рабочие процессы тепловых двигателей.

Нистоцкий Данила Владимирович Студент Самарского национального исследовательского университета им. академика С.П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, e-mail: [danielnist21@gmail.ru](mailto:danielnist21@gmail.ru). Область научных интересов: термоакустические преобразователи и электрические генераторы.

### **THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE THERMALLY INERTIAL ENGINE**

E. F. Bakhvalova<sup>1</sup>, S. O. Nekrasova<sup>1</sup>, D. V. Nistotsky<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Samara University, Samara, Russian Federation, [evgeniya-bahvalova@yandex.ru](mailto:evgeniya-bahvalova@yandex.ru)

*Keywords: heat engine, variable mass thermodynamics, pulsation tube, regenerator, Stirling cycle*

The paper describes the mathematical model of the DPT and presents the results of modeling the steady-state operation in the program for calculating Stirling free-piston engines [3, 4]. It is shown that 30..33 % of the mass of the working fluid located in the pulsation tube does not participate in the cycle during the production of useful work. The regenerative process is evaluated, which consists in the fact that the gas flow in the pulsation pipe in a reciprocating motion passes between two surfaces with a temperature gradient in the flow direction. The flow dynamics in an engine with a pulse tube is considered with the help of the finite element model Fluent, and it is confirmed that the core of the flow does not move, but serves for «shuttle heat transfer» or «fire chain". This volume of the working fluid, called the «regenerative ring", cannot be considered a fully dead volume of the DPT. The dead volume in a Stirling engine tends to be small-especially with a coaxial or beta configuration. Using the developed finite element model of the engine, an estimate is made under which conditions the gas volumes from the cold compression cavity of variable volume cross the entire length of the regenerative ring to enter the hot cavity at the opposite end. Determining the volume of gas that never reaches – let alone passes-the regenerator allows us to determine the possibility of using models of variable-mass thermodynamics similar to those used for beta-configuration Stirling engines.