

Научная статья

УДК 621.436.2 (06)

DOI 10.46845/1997-3071-2023-70-135-147

**Впрыск сжиженного природного газа в камеру сгорания двигателя
для работы по комбинированному циклу**

**Евгений Михайлович Ореховский¹, Александр Викторович Толмачев²,
Александр Георгиевич Филонов³**

^{1,2,3}Калининградский государственный технический университет, Калининград,
Россия

¹evgenij.orekhovskij@klgtu.ru

²avtol03071952@mail.ru

³alexandr.filonov@klgtu.ru, ORCID ID: 0009-0002-6977-8198

Аннотация. В статье приводятся теоретические и экспериментальные исследования для обоснования возможности управления подачей сжиженного природного газа (СПГ) в цилиндр двигателя. В настоящее время большинство двигателей, работающих на природном газе, имеют организацию рабочего цикла со сгоранием при постоянном объеме (цикл Н. Отто). Это объясняется трудностями подачи природного газа в районе верхней мертвой точки. Цикл Н. Отто существенно проигрывает в экономичности комбинированному циклу со сгоранием при постоянном объеме и постоянном давлении (цикл Г. Тринклера). Эксперимент проведен на стенде судового дизельного двигателя «NVD-24» (Ч 17,5/24) на смеси дизельного топлива и нефтяного газа в различных пропорциях, на холостом ходу и с частичной нагрузкой двигателя. Установлено, что сжиженный нефтяной газ под давлением смешивается с дизельным топливом в любых пропорциях, при этом смесь остается однородной жидкостью, без видимых осадков и расслоений. Выполнены расчеты теоретических циклов, показывающие преимущества впрыска горючей смеси в верхней мертвой точке (ВМТ) по сравнению с предварительным смесеобразованием. В процессе эксперимента было установлено, что двигатель с золотниковым топливным насосом высокого давления (ТНВД) и пружинной форсункой может устойчиво работать, используя в качестве топлива жидкую смесь без добавления присадок. При этом давление смеси должно быть больше критического давления газовой фракции. Получены формулы расчета угла опережения подачи топлива до ВМТ и угла подачи за ВМТ. Проведенные расчеты применительно к двигателю «NVD-24» показывают, что аккумуляторная система подачи топлива (Common Rail) с пьезокерамической форсункой может обеспечить работу двигателя по комбинированному циклу. Подобная организация рабочего процесса позволяет легко выполнить модернизацию как новых двигателей, так и находящихся в эксплуатации. При этом топливоподача может выполняться на всех двигателях, независимо от наличия газотурбинного наддува.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, цикл Н. Отто, цикл Г. Тринклера, дизельное топливо, сжиженный природный газ, аккумуляторная система впрыска (Common Rail).

Для цитирования: Ореховский Е. М., Толмачев А. В., Филонов А. Г. Впрыск сжиженного природного газа в камеру сгорания двигателя для работы по комбинированному циклу // Известия КГТУ. 2023. № 70. С. 135–147. DOI: 10.46845/1997-3071-2023-70-135-147.

Original article

LNG injection into engine combustion chamber for combined cycle

Evgeniy M. Orekhovskiy¹, Aleksandr V. Tolmachyov², Aleksandr G. Filonov³

^{1,2,3}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹evgenij.orekhovskij@klgtu.ru

²avtol03071952@mail.ru

³alexandr.filonov@klgtu.ru, ORCID ID: 0009-0002-6977-8198

Abstract. The article presents theoretical and experimental studies to justify the possibility of controlling supply of liquefied natural gas (LNG) to the engine cylinder. At present, most gas engines have operating cycle with constant volume combustion (N. Otto cycle). This is due to difficulty of supplying natural gas in top dead center region. N. Otto cycle significantly loses in efficiency to combined cycle with combustion at constant volume and constant pressure (G. Trinkler cycle). The experiment was carried out on marine diesel engine "NVD-24" stand on a mixture of diesel fuel and petroleum gas in various proportions, at idle and with partial engine load. It has been established that liquefied petroleum gas under pressure is mixed with diesel fuel in any proportions, while mixture remains a homogeneous liquid, without visible precipitation and stratification. Calculations of theoretical cycles have been performed, showing the advantages of the injection of a combustible mixture at the top dead center, in comparison with preliminary carburetion. During the experiment, it was found that an engine with a spool injection pump and a spring nozzle, can operate stably using a liquid mixture as a fuel without adding additives. An increase in the effective efficiency of the engine with an increase in the concentration of LNG in the supplied fuel mixture has been established. In this case, fuel mixture pressure must be greater than critical pressure of the gas mixture. Formulas for calculating advance angle of fuel supply to the top dead center and angle of delivery behind the top dead center are obtained. The performed calculations in relation to "NVD-24" engine show that Common Rail fuel supply system with a piezoceramic injector can ensure the operation of the engine in a combined cycle. This organization of workflow makes it easy to upgrade both new engines and those in operation. In this case, fuel supply can be performed on all engines, regardless of presence of gas turbine pressurization.

Keywords: internal combustion engine, N. Otto cycle, G. Trinkler cycle, diesel fuel, liquefied natural gas, common rail injection system.

For citation: Orekhovskiy E. M., Tolmachiov A. V., Filonov A. G. LNG injection into engine combustion chamber for combined cycle. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2023; (70) : 135-147. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2023-70-135-147.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно двигателями внутреннего сгорания называют преимущественно поршневые двигатели. Особое место среди перспективных стационарных и транспортных энергоустановок занимает новое поколение поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС), работающих на природном газе по циклу Отто, – газовые двигатели с принудительным (искровым) зажиганием. Ведущие двигателестроительные фирмы («Vartsila», «MAN», «Deutz», «Nigata Caterpillar», «Cummins», «Waukesha Engine Dresser», «MWM», «MTU Onsite Energy GmbH», «GE Energy», «Mitsubishi», «Heavy Industries Ltd», «FGWilson», «Rolls Royce Power Engineering Plc») наряду с обычными дизельными двигателями выпускают двигатели, работающие на природном газе[1–10].

Существует три основных вида циклов поршневых двигателей внутреннего сгорания:

- цикл Р. Дизеля (сгорание топлива при постоянном давлении);
- цикл Н. Отто (сгорание топлива при постоянном объеме);
- цикл Г. Тринклера (сгорание топлива при постоянном объеме и постоянном давлении – комбинированный цикл), сочетающий особенности циклов Отто и Дизеля.

В настоящее время на газовых двигателях применяют следующие способы организации подачи горючего газа:

- топливо в газообразной (распыленной) фазе подается в воздушный ресивер;
- топливо в газообразной фазе подается в цилиндр в начале такта сжатия;
- топливо впрыскивается в сжатый воздух с высокой температурой.

Источником воспламенения топлива в цикле Отто служит электрическая свеча, в циклах Дизеля и Тринклера происходит самовоспламенение. В некоторых моделях для принудительного воспламенения газа используют комбинированный впрыск жидкого дизельного топлива или мазута.

Предварительная подготовка горючей смеси до верхней мертвой точки перед воспламенением приводит к интенсивному взрывному сгоранию. Давление и температура резко возрастают, затем начинается расширение (рабочий ход). Так как в цилиндре происходит предварительное смесеобразование, как в бензиновых двигателях, такой двигатель работает при сгорании при постоянном объеме, по циклу Отто. В то же время хорошо известно, что цикл Отто имеет повышенные температуры сгорания и меньший термодинамический КПД по сравнению с циклом Тринклера.

В этой связи, целью данного исследования являлась проверка устойчивой работы двигателя по комбинированному циклу на сжиженном газе (цикл работы дизельных двигателей) со сгоранием при постоянном объеме и постоянном давлении.

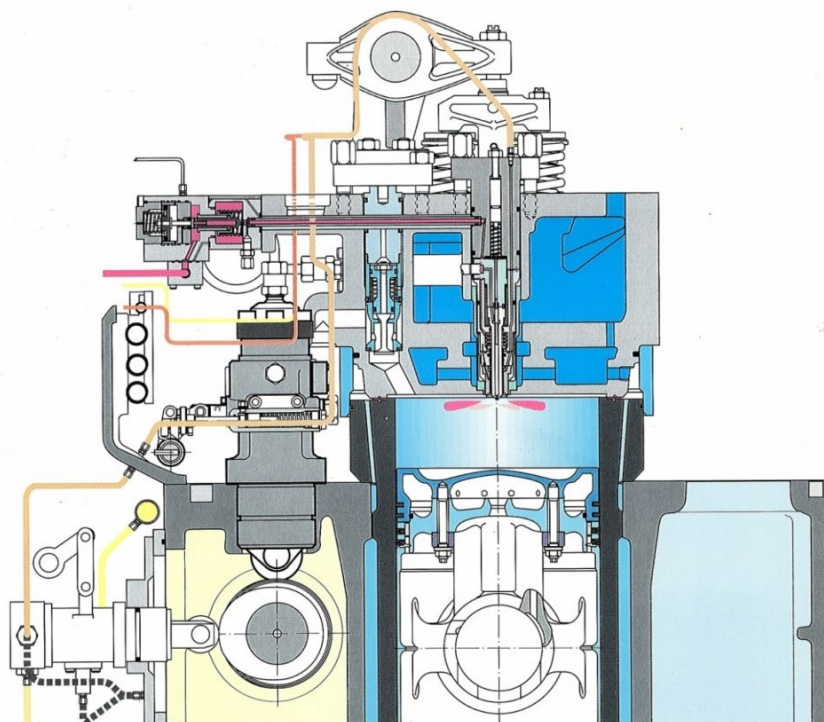


Рис. 1. Комбинированная форсунка подачи газа и жидкого топлива двигателя фирмы «Vartsila»
Fig. 1. Combined gas and liquid fuel injector for "Vartsila" engine

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для сравнения эффективности циклов Отто и Тринклера были выполнены тепловые расчеты двигателя «NVD-24», работающего на природном газе [11–13] с подводом теплоты при постоянном объеме (цикл Отто), а также с подводом теплоты при постоянном объеме и постоянном давлении (комбинированный цикл Тринклера).

Результаты расчетов представлены в табл. 1 и на рис. 2, где: ε – степень сжатия, λ – степень повышения давления в цилиндре, ρ – степень предварительного расширения, α – коэффициент избытка воздуха при сгорании, T_c – температура в конце процесса сжатия, P_z – давление сгорания, P_i – среднее индикаторное давление, η_i – индикаторный КПД двигателя.

Таблица 1. Сравнительные расчетные показатели циклов Отто и Тринклера
Table 1. Comparative calculated indicators of Otto and Trinkler

Цикл	ε	λ	ρ	α	$T_c, ^\circ\text{C}$	$P_z, \text{бар}$	$P_i, \text{бар}$	η_i
Отто	10,5	2,46	1,000	1,92	521	54,4	6,31	43,2
Тринклера	14,85	1,56	1,305	2,25	592	55,0	6,05	47,5

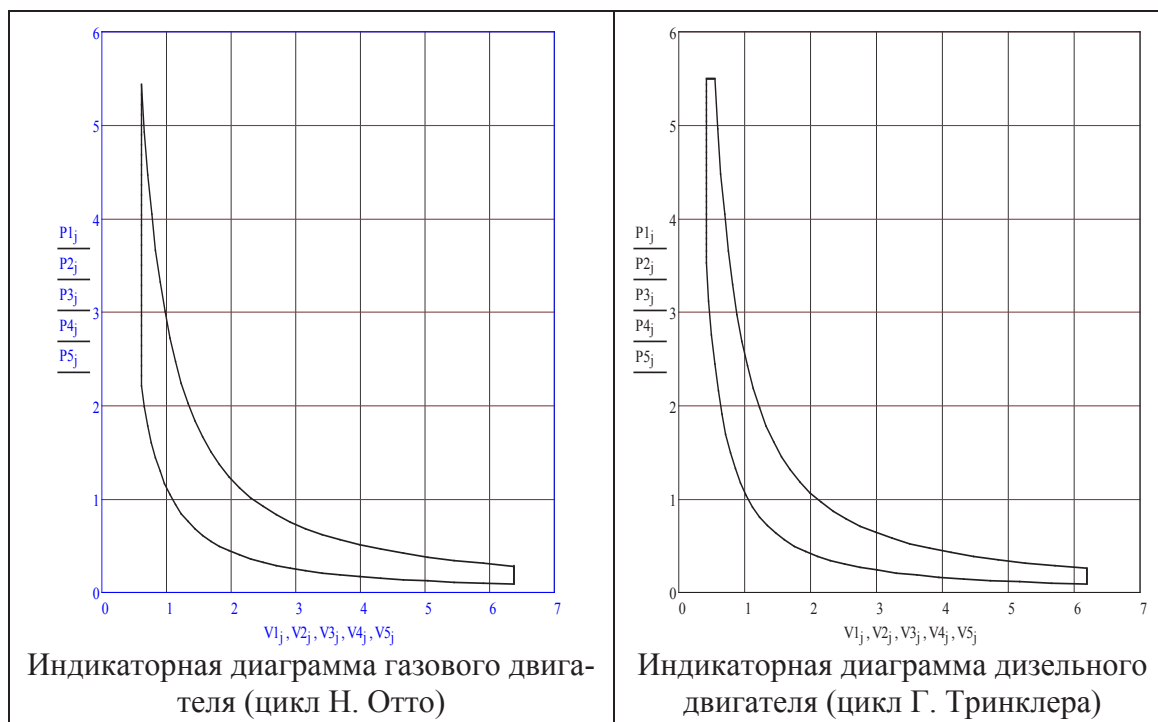


Рис. 2. Расчетные индикаторные диаграммы циклов Н. Отто и Г. Тринклера
Fig. 2. Calculated indicator diagrams of cycles by N. Otto and G. Trinkler

Из сопоставления результатов расчетов циклов Н. Отто и Г. Тринклера видно, что цикл с комбинированным подводом теплоты при равных давлениях сгорания и равных индикаторных давлениях имеет более высокий КПД. Кроме того, форсирование рабочего процесса с помощью наддува в первом варианте вообще невозможно, газообразная фаза не позволяет свежему воздуху заполнить весь рабочий объем цилиндра. Однако температура самовоспламенения газового топлива (метан, пропан, бутан) существенно выше, чем дизельного, поэтому при простом впрыске газа в камеру сгорания двигателя нет полной уверенности в том, что газ будет самовоспламеняться так же, как дизельное топливо, это ставит под сомнение возможность стабильной работы двигателя. Для решения этой проблемы предлагается растворить в сжиженном газе некоторое количество дизельного топлива, которое теоретически будет воспламеняться первым и впоследствии воспламенит газовую фазу топлива.

Задача подачи в цилиндр СПГ в области ВМТ до настоящего времени не решена, так как температура и давление существования СПГ должны соответствовать закритическим параметрам [14].

В настоящее время системы подачи и распыливания топлива дополнились аккумуляторной системой подачи с электроуправляемыми форсунками – Common Rail [15]. Давление в аккумуляторе таких систем составляет 200–300 МПа, что на порядок превышает критическое давление горючего газа. Система Common Rail позволяет осуществить впрыск сжиженного газа под высоким давлением в камеру сгорания, после чего жидкая фаза превращается в газообразную, перемешивается с воздухом и под воздействием высокой температуры самовоспламеняется. Конструкция пьезокерамической форсунки приведена на рис. 3 [10].

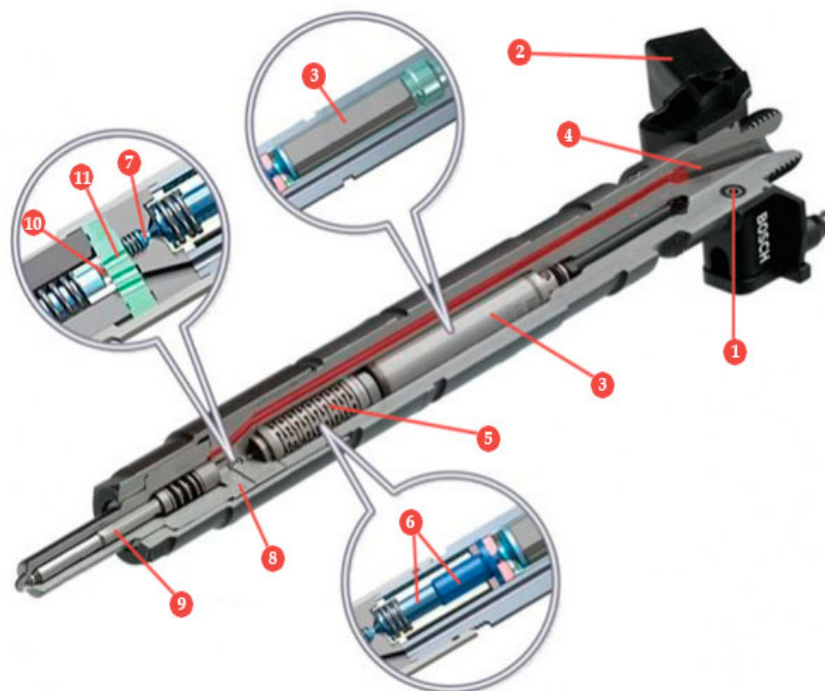


Рис. 3. Устройство (разрез) пьезо-керамической форсунки:

1 – сливная магистраль; 2 – электрический разъем; 3 – пьезоэлемент; 4 – канал высокого давления; 5 – гидравлический цилиндр; 6 – сопряженные поршни; 7 – переключающий клапан (мультипликатор); 8 – дроссельная пластина; 9 – игла распылителя; 10 – надигольная камера; 11 – выпускной дроссель

Fig. 3. The device (section) of piezo-ceramic nozzle:

1 – drain line; 2 – electrical connector; 3 – piezoelectric element; 4 – high pressure channel; 5 – hydraulic cylinder; 6 – coupled pistons; 7 – switching valve (multiplier); 8 – throttle plate; 9 – spray needle; 10 – needle chamber; 11 – exhaust throttle

Температура самовоспламенения и другие физико-химические свойства топлив приведены в табл. 2.

Таблица 2. Физико-химические свойства горючих газов и дизельного топлива
Table 2. Physical and chemical properties of combustible gases and diesel fuel

Вид топлива	Давление жидкой фазы, бар	Плотность жидкой фазы, кг/м ³	Температура самовоспламенения, °С
Дизельное топливо	1	860	230
Бутан	1,5	580	429
Пропан	16	505	466
Этан	38	560	515
Метан	46,3	416	537

Быстродействие пьезокерамических форсунок позволяет реализовать различные законы подачи топлива, некоторые из них приведены на рис. 4 [10].

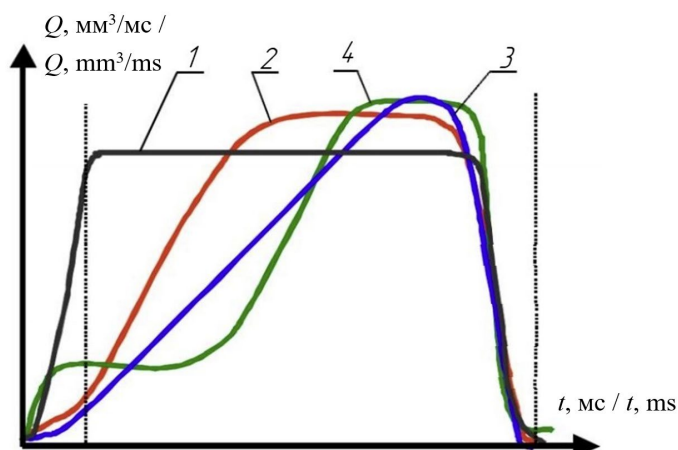


Рис. 4. Законы подачи топлива, реализуемые аккумуляторной системой впрыска Common Rail:

1 – постоянная скорость подачи; 2 – подача с нарастающей и постоянной скоростью; 3 – подача с нарастающей скоростью; 4 – подача со ступенчатым впрыском
Fig. 4. Fuel supply laws implemented Common Rail injection system:
1 – constant feed rate; 2 – feed with increasing and constant speed; 3 – supply with increasing speed; 4 – supply with staged injection

На рис. 5 приведена диаграмма раздела фаз метана, где имеется область с закритическим давлением и обычной температурой [14]. В этой области вещество (сверхкритическая жидкость) обладает специфическими характеристиками: при снижении давления жидкость мгновенно превращается в газ.

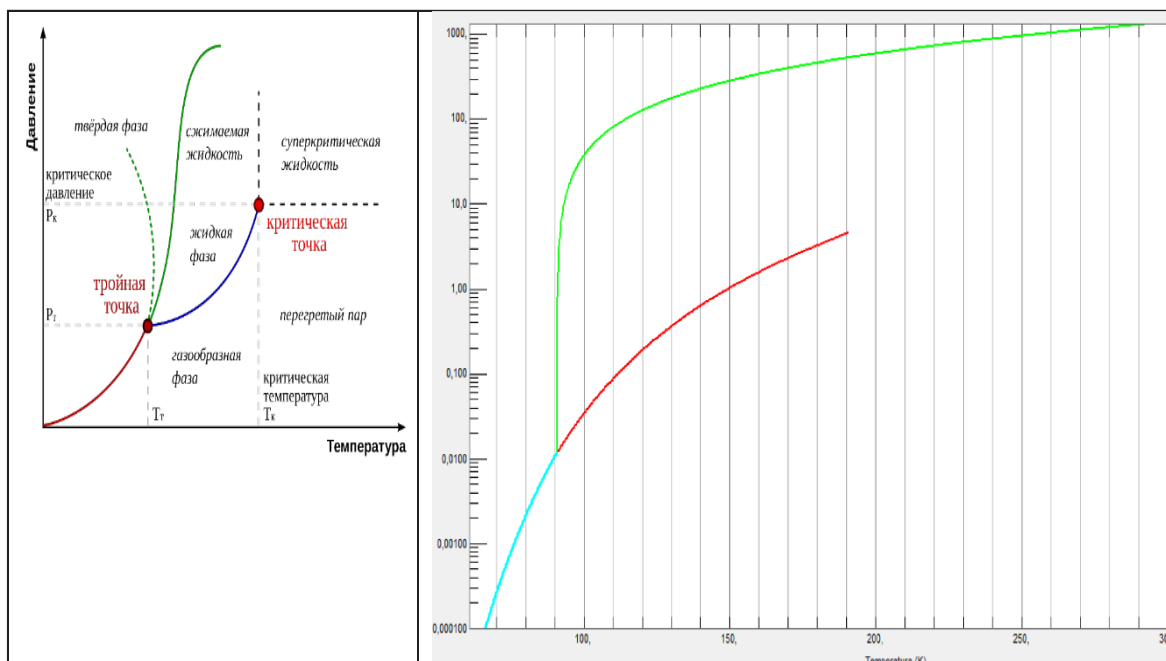


Рис. 5. Диаграмма раздела фаз метана
Fig. 5. Metanphase diagram

Для надежного самовоспламенения предлагается растворить в сжиженном газе некоторое количество дизельного топлива, которое будет воспламеняться в первую очередь и в дальнейшем воспламенит газовую фазу топлива.

Подобная идея затрагивалась в статье [10], где была разработана топливная система для тепловозных дизелей, позволяющая работать на смеси дизельного топлива и сжиженного нефтяного газа (СНГ). Авторами установлено, что при равных пропорциях смешения дизельного топлива и СНГ (примерно 1:1) для лучшей самовоспламеняемости такой смеси необходимо добавлять 1–2 % специальных присадок (бутилнитрат или гидроперекись кумола).

Описание экспериментальной установки. Для проверки реализации предлагаемой идеи в лаборатории судовых и стационарных энергетических установок кафедры энергетики КГТУ был собран экспериментальный стенд на базе дизельного двигателя «NVD-24», который дополнительно оснащался системой смешивания жидкого нефтяного газа (пропан-бутана) с дизельным топливом в различных пропорциях. Сам двигатель остался без конструктивных изменений.

Принципиальная схема, а также фотография смесительного узла жидкого газа и дизельного топлива показаны на рис. 6, 7.

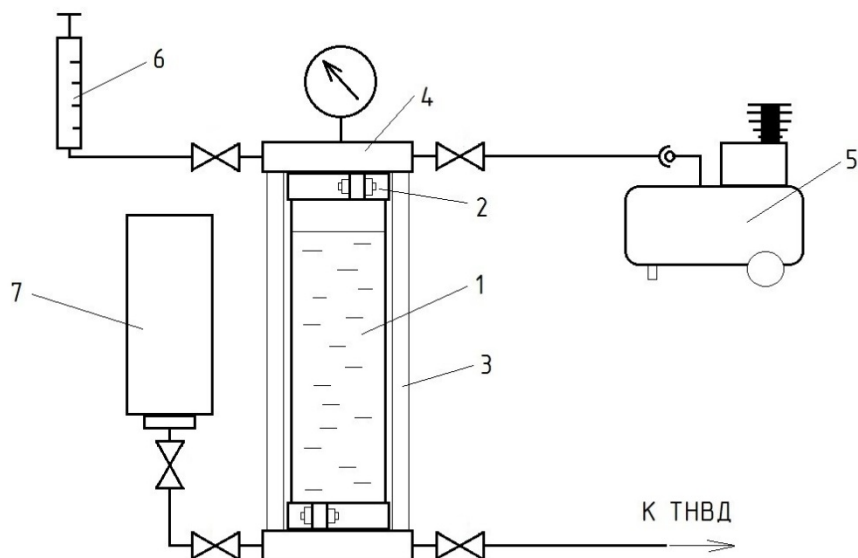


Рис. 6. Принципиальная схема смесителя жидкого газа и дизельного топлива:
1 – смесительный аккумулятор (700 мл); 2 – стяжной хомут; 3 – резьбовая шпилька; 4 – фланец-крышка; 5 – воздушный компрессор с ресивером;
6 – поршневой дозатор дизельного топлива (150 мл); 7 – газовый баллон

Fig. 6. Schematic diagram of a liquid gas and diesel fuel mixer:
1 – mixing accumulator (700 ml); 2 – coupling collar; 3 – threaded stud;
4 – flange cover; 5 – air compressor with receiver;
6 – piston dispenser of diesel fuel (150 ml); 7 – gas cylinder

Система позволяет заполнять смесительную камеру 1 дизельным топливом и сжиженным газом в необходимой пропорции. Чтобы сжиженный газ не вскипал, давление в смесительной камере создается воздушным компрессором 5 и контролируется манометром на распределительной крышке 4. Результаты эксперимента представлены в табл. 3.

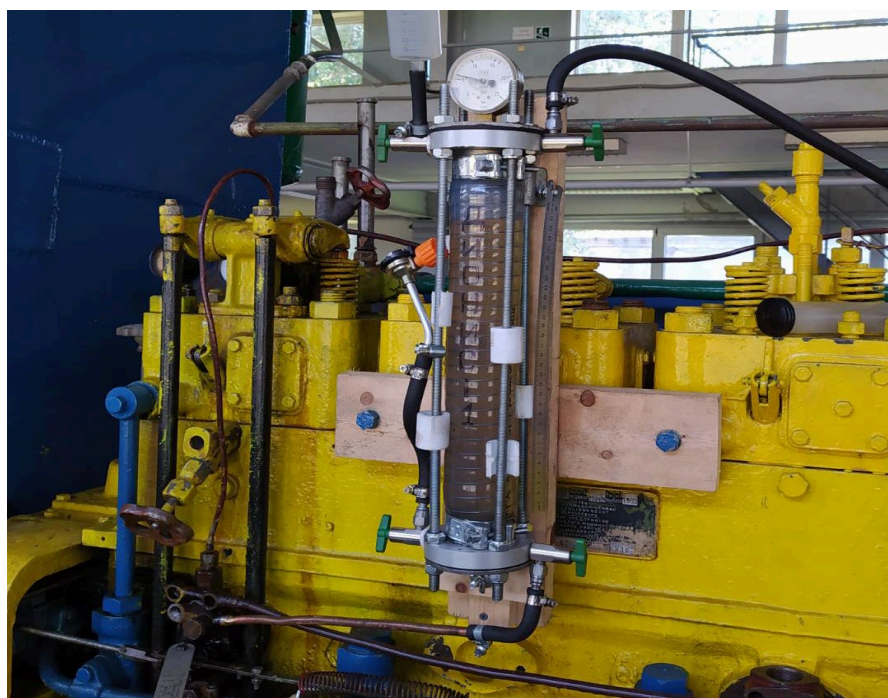


Рис. 7. Монтаж смесительного устройства на двигателе «NVD-24»
Fig. 7. Mounting the mixing device on “NVD-24” engine

Таблица 3. Результаты экспериментальных исследований при различных пропорциях смешения дизельного топлива и сжиженного нефтяного газа

Table 3. Results of experimental studies at various proportions of mixing diesel fuel and liquefied petroleum gas

Параметры	ДТ	ДТ	ДТ+СНГ 1/1	ДТ+СНГ 1/1	ДТ+СНГ 1/2	ДТ+СНГ 1/2	ДТ+СНГ 1/2
Номер испытания	1	2	3	4	5	6	7
Плотность топлива ρ , кг/м ³	0,86	0,86	0,686	0,686	0,628	0,628	0,628
Крутящий момент M , Н·м	7,09	85,09	7,09	78,00	7,09	49,64	81,54
Эффективная мощность N_e , кВт	0,42	5,08	0,42	4,65	0,42	2,96	4,86
Расход топлива G , кг/ч	1,91	2,05	1,05	1,812	1,145	1,45	1,60
Удельный расход топлива g_e , г/кВт·ч	4513,9	404,3	2484,1	389,5	2706,8	490,2	329,6
Эффективный КПД, η_e , %	1,89	21,2	3,3	21,3	3,0	16,7	24,8

Крутящий момент двигателя измерялся штатным гидротормозом. Работа двигателя на горючей смеси проходила на холостом ходу и под нагрузкой без каких-либо нарушений, стабильно и устойчиво, без посторонних шумов.

Для проверки возможности организации впрыска СПГ системой Common Rail по циклу Тринклера необходимо рассчитать углы подачи топлива до ВМТ и после ВМТ.

Впрыск, обеспечивающий работу двигателя по циклу Тринклера, можно условно разделить на две фазы: 1 – впрыск и сгорание при постоянном объеме, 2 – впрыск и сгорание при постоянном давлении. В первой и во второй фазах впрыска соответственно подводится теплота:

$$q_v = C_v(T_y - T_c) \text{ кДж/кг}, \quad (1)$$

$$q_p = C_v(T_z - T_y) \text{ кДж/кг}. \quad (2)$$

Доля теплоты, подводимая в первой и второй фазах горения, соответственно составляют:

$$X_v = q_v / (q_v + q_p), \quad X_p = q_p / (q_v + q_p). \quad (3)$$

Используя безразмерные параметры цикла (табл. 1), можно привести соотношения (3) к выражениям (4), (5) и выполнить расчеты для цикла Тринклера применительно к двигателю «NVD-24»:

$$X_v = \frac{\lambda - 1}{k \cdot \lambda \cdot (\rho - 1) + \lambda - 1} = 0,419, \quad (4)$$

$$X_p = \frac{k \cdot \lambda \cdot (\rho - 1)}{k \cdot \lambda \cdot (\rho - 1) + \lambda - 1} = 0,581. \quad (5)$$

Угол поворота коленчатого вала φ_z , соответствующий окончанию горения смеси по изобаре, может быть определен из решения системы уравнений движения поршня от ВМТ (6), (7):

$$\cos(\varphi_z) + \frac{1}{\lambda_s} \cos(\psi_z) = 1 + \frac{1}{\lambda_s} - 2 \frac{\rho - 1}{\varepsilon - 1}, \quad (6)$$

$$\sin(\psi_z) = \lambda_s \cdot \sin(\varphi_z), \quad (7)$$

где: $\lambda_s = 0,25$ – постоянная кривошипно-шатунного механизма; ψ_z – угол поворота шатуна от ВМТ.

Система уравнений (6), (7) решается методом последовательных приближений. Для расчетного цикла Тринклера (рис. 2) угол подачи топливной смеси при постоянном давлении составит $\varphi_z = 14,701$ градусов поворота коленчатого вала.

В соответствии с законом пропорциональной подачи топлива от времени (рис. 4, кривая 1) получим угол подачи топлива при постоянном объеме (угол опережения подачи топливной смеси до ВМТ):

$$\varphi_y = \varphi_z \frac{X_v}{X_p} = 10,62 \text{ градусов поворота коленчатого вала}. \quad (8)$$

Полный угол опережения подачи топлива составит:

$$\varphi_{yz} = \varphi_y + \varphi_z = 25,321 \text{ градусов поворота коленчатого вала}. \quad (9)$$

Время организации впрыска СПГ системой Common Rail с учетом частоты вращения двигателя $n = 650$ об./мин:

$$\tau = \frac{\varphi_{yz}}{6 \cdot n} = 0,005627 \text{ с}. \quad (10)$$

Площадь необходимого сечения сопловых отверстий распылителя определяется из уравнения расхода:

$$f_c = \frac{g_c}{\mu_c \cdot i_c \cdot \sqrt{2 \cdot (P_m - P_z)} \cdot 10^5 \cdot \rho_m \cdot \tau} = 5,591 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2, \quad (11)$$

где g_c – цикловая подача топлива, кг; $\mu_c = 0,6$ – коэффициент расхода соплового отверстия; $i_c = 6$ – число сопловых отверстий распылителя двигателя «NVD-24»; $P_m = 2000$ бар – среднее давление впрыска топлива; $\rho_m = 416$ кг/м³ – плотность СПГ.

Зная площадь сопловых отверстий, легко определить их диаметр $d_c = 0,344$ мм. Представленная методика расчета вполне может быть реализована на топливной аппаратуре дизельных двигателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенное исследование показывает, что в дизельном двигателе возможно организовать сгорание смеси горючего газа в жидкой фазе с дизельным топливом по циклу Тринклера с КПД не менее, чем на дизельном топливе.

2. Двигатель на смеси ДТ и СНГ работает устойчиво, без пропусков вспышек и без использования дополнительных присадок.

3. Для реализации цикла Тринклера целесообразно применить для подачи горючей смеси аккумуляторную систему с пьезокерамическими форсунками типа Common Rail. При этом двигатель имеет минимальные изменения в конструкции.

4. Приведенная методика позволяет реализовать впрыск СПГ во всех существующих дизельных двигателях при их модернизации независимо от наличия газтурбинного наддува.

Список источников

1. Вершина Г. А., Быстренков О. С. Способы организации рабочего процесса газодизельного двигателя // Наука и техника. 2017. № 5. С. 383-390.

2. Хачиян А. С., Шишлов И. Г., Карпов Д. М. Сравнительный анализ циклов газового и газодизельного двигателей большой размерности // Транспорт на альтернативном топливе. 2013. № 2 (32). С. 30–33.

3. Семенов Б. Н. Применение сжиженного газа в судовых дизелях. Ленинград: Судостроение, 1969. 176 с.

4. Слепнева Н. П., Комина Г. П., Нефедова М. А. Метан как перспективное топливо // Вестник науки и образования. 2019. № 21. С. 22–24.

5. Международная Морская Организация. Предотвращение загрязнения воздуха с судов. URL: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/-PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Air-Pollution.aspx> (дата обращения: 10.09.2020).

6. Газпром Нефть. Бункеровка судов. URL: <https://www.gazprom-neft.ru/company/retail/bunkering> (дата обращения: 12.09.2020).

7. Sea News. 60 % судов на СПГ к 2025 году. URL: <https://seanews.ru/2019/04/30/ru-60-sudov-na-spg-k-2025-godu> (дата обращения: 15.05.2019).

8. Матвейчук А. А. Газовая развилка // Сибирская нефть: электронный научный журнал. 2016. № 128. URL: <https://www.Gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2016-february/1111828> (дата обращения: 18.09.2020).

9. Новицкий И. Россия переходит на газомоторное топливо. Коллективный блог «Конт». 23.07.2015. URL: <http://cont.ws/post/103554> (дата обращения: 26.09.2020).

10. Об использовании сжиженного нефтяного газа в качестве топлива для тепловозных дизелей / В. Р. Ведрученко, А. И. Володин, В. Т. Данковцев, В. В. Крайнов, Е. В. Панькин // Омский научный вестник. 2001. С. 78–81.
11. Ваншейдт В. А. Дизели: справочник. Ленинград: Машиностроение, 1977. 490 с.
12. Рогалев Н. Д., Дудолин А. А., Олейникова Е. Н. Тепловые электрические станции: учебник. Москва: МЭИ, 2022. 768 с.
13. Гольдинер А. Я., Цыркин М. И., Бондаренко В. В. Газопоршневые электроагрегаты. Санкт-Петербург: Галерея Принт, 2006. 240 с.
14. Термодинамические свойства метана / В. В. Сычев, А. А. Вассерман, В. А. Загорученко, А. Д. Козлов. Москва: Издательство стандартов, 1979. 348 с.
15. Габитов И. И., Неговора А. В., Сафин Ф. Р. Оценка технического состояния электроуправляемых форсунок дизелей по характеристике топливоподачи // Инженерные технологии и системы. 2021. Т. 31, № 2. С. 207–226.

References

1. Vershina G. A., Bystrenkov O. S. Sposoby organizatsii rabocheho protsessa gazodizel'nogo dvigatelya [Ways to organize gas-diesel engine working process]. *Nauka i tekhnika*, 2017, no. 5, pp. 383–390.
2. Hachiyani A. S., Shishlov I. G., Karpov D. M. Sravnitel'nyy analiz tsiklov gazovogo i gazodizel'nogo dvigateley bol'shoy razmernosti [Comparative analysis of cycles of gas and gas-diesel large dimension engines]. *Transport na al'ternativnom toplive*, 2013, no. 2 (32), pp. 30–33.
3. Semenov B. N. *Primenenie szhizhennogo gaza v sudovykh dizelyakh* [The use of liquefied gas in marine diesel engines]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1969. 176 p.
4. Slepneva N. P., Komina G. P., Nefedova M. A. Metan kak perspektivnoe toplivo [Methane as a promising fuel]. *Vestnik nauki i obrazovaniya*, 2019, no. 21, pp. 22–24.
5. International Maritime Organization. Air Pollution Prevention from Ships, available at: [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/-Pollution Prevention/ Air-Pollution/Pages/Air-Pollution.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/-Pollution%20Prevention/Air%20Pollution/Pages/Air-Pollution.aspx) (Accessed 10 September 2020).
6. Gazprom Neft. Ship bunkering, available at: <https://www.gazprom-neft.ru/company/retail/bunkering> (Accessed 12 September 2020).
7. Sea news. 60 % LNG-powered ships by 2025, available at: <https://seanews.ru/2019/04/30/ru-60-sudov-na-spg-k-2025-godu> (Accessed 15 May 2019).
8. Matveychuk A. A. Gazovaya razvilka [Gas fork]. *Sibirskaya neft'*, 2016, no. 128, available at: <https://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2016-february/1111828> (Accessed 18 September 2020).
9. Novitskiy I. Russia is switching to gas motor fuel. Collective blog "Kont". 23.07.2015, available at: <http://cont.ws/post/103554> (Accessed 26 September 2020).
10. Vedruchenko V. R. [i dr.]. Ob ispol'zovanii szhizhennogo neftyanogo gaza v kachestve topliva dlya teplovoznnykh dizeley [On the use of liquefied petroleum gas as a fuel for locomotive diesels]. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2001, pp. 78–81.
11. Vansheydt V. A. *Dizeli: spravochnik* [Diesels: directory]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1977, 490 p.

12. Rogalev N. D., Dudolin A. A., Oleynikova E. N. *Teplovye elektricheskie stantsii: uchebnik* [Thermal power stations: textbook]. Moscow, MEI Publ., 2022, 768 p.
13. Gol'diner A. Ya., Tsyarkin M. I., Bondarenko V. V. *Gazoporshnevye elektro-agregaty* [Gas piston electric units]. Saint-Petersburg, Galereya Print Publ., 2006, 240 p.
14. Sychev V. V., Vasserman A. A., Zagoruchenko V. A., Kozlov A. D. *Termodynamicheskie svoystva metana* [Thermodynamic properties of methane]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1979, 348 p.
15. Gabitov I. I., Negovora A. V., Safin F. R. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya elektroupravlyaemykh forsunok dizeley po kharakteristike toplivopodachi [Evaluation of the technical condition of electrically controlled diesel injectors according to the fuel supply characteristics]. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy*, 2021, vol. 31, no. 2, pp. 207–226.

Информация об авторах

Е. М. Ореховский – аспирант кафедры энергетики

А. В. Толмачев – кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики

А. Г. Филонов – кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики

Information about the authors

E. M. Orekhovskiy – postgraduate student of Energy Department

A. V. Tolmachiov – PhD in engineering, Associate Professor of Energy Department

A. G. Filonov – PhD in engineering, Associate Professor of Energy Department

Статья поступила в редакцию 13.06.2023; одобрена после рецензирования 23.06.2023; принята к публикации 06.07.2023.

The article was submitted 13.06.2023; approved after reviewing 23.06.2023; accepted for publication 06.07.2023.