

# МЕТОД ИМИТАЦИИ НАГРУЖЕНИЯ ФОРСИРОВАННОГО ДИЗЕЛЯ НА РЕЖИМАХ ПУСКА В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА

к.т.н. Бондарь В.Н., д.т.н. Кукис В.С., д.т.н. Малоземов А.А.  
Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)  
8 (951) 524-25-48, idem37@mail.ru

*В статье описан метод имитации нагружения форсированного дизеля на режимах пуска в условиях низких температур окружающего воздуха. Для повышения достоверности результатов экспериментальной оценки пусковых качеств дизеля разработано устройство, имитирующее сопротивление прокручиванию коленчатого вала со стороны элементов трансмиссии объекта применения. Устройство обеспечивает возможность регулирования и изменения момента сопротивления прокручиванию коленчатого вала. Разработана методика проведения пусковых испытаний высокофорсированного двигателя, оснащенного системами предпусковой подготовки и облегчения пуска, с данным устройством в климатической камере. Параметры загрузки принимались для объекта применения двигателя типа 12ЧН15/16. В соответствии с программой испытаний было проведено 20 опытов при температурах окружающего воздуха плюс 5, минус 5 и минус 20°С. Результаты экспериментального исследования подтвердили эффективность и адекватность разработанного метода. Выявлено, что момент страгивания коленчатого вала при разгоне двигателя не зависит от загрузки двигателя и вязкости масла (в пределах температур окружающего воздуха при испытаниях), а определяется моментом инерции вращающихся масс. При прокручивании дизеля давление загрузки обеспечивается практически одновременно с началом страгивания коленчатого вала двигателя. Загрузка насоса устройства давлением 14 МПа приводит к увеличению момента сопротивления прокручиванию коленчатого вала при температуре окружающего воздуха минус 20°С на 9 % (с 883 до 970 Н·м). По результатам испытаний сформулированы рекомендации по дальнейшему совершенствованию устройства для имитации нагружения форсированного дизеля на режимах пуска в условиях низких температур окружающего воздуха.*

**Ключевые слова:** дизель, пусковые качества, испытания, климатическая камера, устройство нагружения.

## Введение

Форсирование двигателей неизбежно связано с повышением максимального давления сгорания и, как следствие, с увеличением нагрузок на детали кривошипно-шатунного механизма. Для ограничения максимального давления сгорания на допустимом, с точки зрения механической нагруженности двигателя, уровне снижают степень сжатия до 11...13 единиц, что ведет к резкому ухудшению пусковых качеств двигателя. Например, дизель типа 12ЧН15/16 со степенью сжатия 11 без средств облегчения пуска запускается при температуре окружающего воздуха 27...30°С. Для обеспечения нормативных значений пусковых качеств используются средства предпусковой подготовки и облегчения пуска [1, 2], эффективность которых проверяется при пусковых испытаниях.

Однако испытания отдельного двигателя при низких температурах окружающего воздуха не учитывают влияние элементов трансмиссии моторно-трансмиссионной установки и зависимости вязкости трансмиссионного масла от температуры, следовательно, не в полной мере адекватны объекту применения. Таким образом, имеет место проблема совершенствования методов пусковых испытаний форсированных дизелей с пониженной степенью сжатия, которая, учитывая важность обеспечения нормативных значений их пусковых качеств, является актуальной.

**Целью работы** является создание метода имитации нагружения форсированного дизеля на режимах пуска в условиях низких температур окружающего воздуха.

Достижение указанной цели предполагает решение следующих задач исследования:

- разработка устройства, имитирующего сопротивление прокручиванию коленчатого вала со стороны элементов трансмиссии объекта применения, и обоснование режимов его работы;
- разработка и обоснование методики пусковых испытаний форсированного дизеля с пониженной степенью сжатия в климатической камере при низких температурах окружающей среды с применением устройства нагружения;
- проведение экспериментального исследования с целью подтверждения эффективности и адекватности разработанного метода, анализ его результатов.

### Методы и результаты исследования

Общее уравнение динамики процесса прокручивания и пуска двигателя может быть представлено в виде [3]:

$$\begin{aligned} (M_{\text{ст}} + M_{\text{возд}}) = \pm (I_{\text{дв}} + I_{\text{тр}}) \cdot \frac{dw}{d\tau} + \\ + (M_{\text{т.дв}} + M_{\text{т.тр}}) + M_{\text{сж}} - M_{\text{расш}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $M_{\text{ст}}$  – вращающий момент стартера;  $M_{\text{возд}}$  – вращающий момент от воздействия на поршни пускового воздуха;  $I_{\text{дв}}$ ,  $I_{\text{тр}}$  – моменты инерции движущихся элементов двигателя и трансмиссии;  $dw/d\tau$  – приращение скорости во время разгона двигателя;  $M_{\text{т.дв}}$ ,  $M_{\text{т.тр}}$  – моменты трения двигателя и трансмиссии, соответственно;  $M_{\text{сж}}$  – момент от сжатия воздушного заряда в цилиндрах двигателя;  $M_{\text{расш}}$  – момент от расширения воздушного заряда (этот момент меньше  $M_{\text{сж}}$  в связи с тепловыми потерями и утечками заряда через неплотности поршневых колец на тактах сжатия и расширения).

Анализ формулы (1) позволяет оценить значения отдельных составляющих за весь процесс пуска двигателя. Процесс разгона характеризуется увеличением скорости от нуля до некоторого значения за счет избытка энергии пуска. При установившейся частоте вращения коленчатого вала двигателя присоединенные массы трансмиссии выполняют роль маховика, снижая колебания угловой скорости, вызванные разностью моментов сжатия и расшире-

ния воздушного заряда на соответствующих тактах в цилиндрах двигателя. На этой стадии процесса пуска определяющим моментом сопротивления прокручиванию коленчатого вала является момент трения в узлах двигателя и трансмиссии, который в значительной степени зависит от вязкости масла. При этом, если скорость вращения двигателя достигла пусковой, при которой в конце такта сжатия с помощью подогревателя воздуха на впуске (ПВВ) обеспечиваются термодинамические условия, достаточные для воспламенения топлива, двигатель выйдет на самостоятельный режим холостого хода после отключения системы пуска.

Однако небольшая на холостом ходу цикловая подача топлива, впрыскиваемого в относительно менее плотную среду воздушного заряда в цилиндрах двигателя в конце сжатия, вызывает нестабильность его воспламенения. Подключение дополнительного сопротивления в виде элементов трансмиссии вызывает увеличение моментов трения и снижение скорости прокручивания. В то же время повышение момента трения приводит к увеличению хода рейки топливного насоса, т.е. увеличению цикловой подачи топлива, что способствует улучшению смесеобразования и повышению стабильности воспламенения топлива. Это обстоятельство в какой-то мере компенсирует отрицательное влияние на пуск дополнительного момента трения.

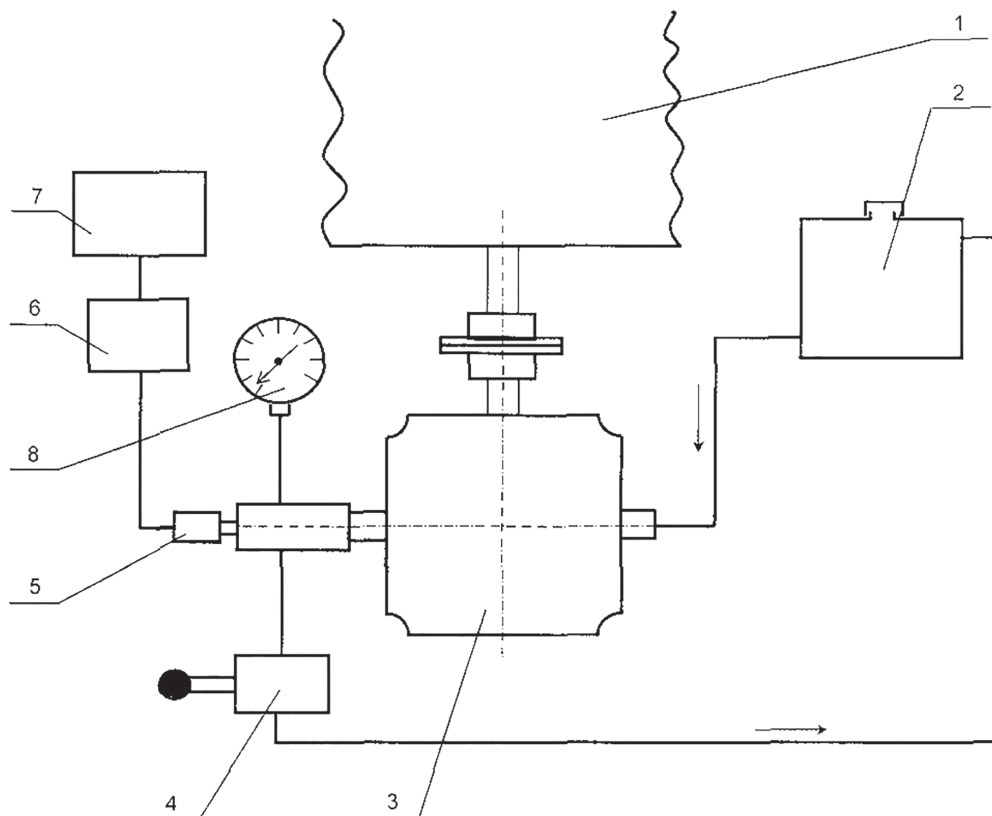
В качестве основы устройства нагружения двигателя (рис. 1) было предложено использовать масляный насос высокого давления типа НШ-100Л, который соединяется с двигателем через шлицевое соединение со стороны основного отбора мощности. Загрузка осуществляется дросселем 4. При этом дроссель в нормальном положении постоянно открыт, а его включение осуществляется специальной рукояткой. Циркуляция масла осуществляется через емкость 2.

Момент сопротивления рассчитывается по формуле:

$$M_c = M_{\text{ст}} \cdot i \cdot \eta, \quad (2)$$

где  $i = 12$  – передаточное отношение привода;  $\eta = 0,85$  – КПД привода.

Определение мощности, необходимой для прокручивания насоса, в кВт производится расчетным методом:



**Рис. 1. Схема устройства для имитации нагружения форсированного дизеля на режимах пуска в условиях низких температур окружающего воздуха:**

1 – двигатель; 2 – масляный бак; 3 – насос НШ-100; 4 – загрузочное устройство (дроссель); 5 – датчик давления; 6 – усилитель; 7 – осциллограф; 8 – манометр

$$N_{\text{пр}} = \frac{V_n \cdot n_n \cdot p_n}{\eta_n}, \quad (3)$$

где  $V_n = 0,1 \text{ дм}^3$  – рабочий объем насоса;  $n_n$  – частота вращения вала насоса,  $\text{с}^{-1}$ ;  $p_n$  – давление масла на выходе из насоса, МПа;  $\eta_n$  – КПД насоса, который принят равным 0,85.

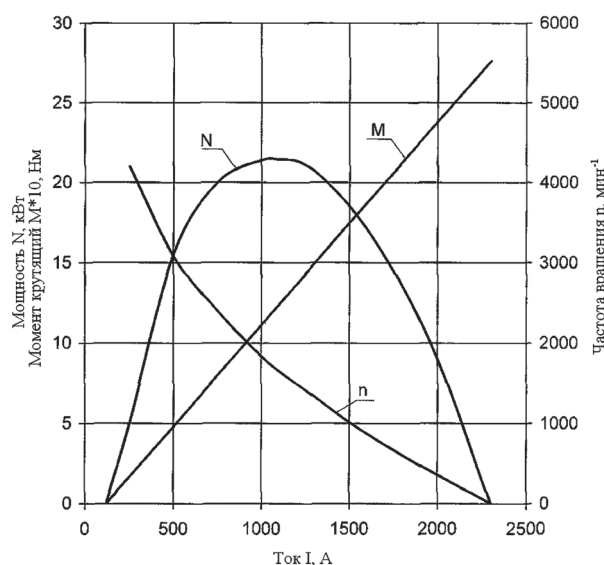
При проведении испытаний момент сопротивления определяется по току стартера. Зависимость крутящего момента стартера от тока нагрузки представлена графиком характеристики стартера (рис. 2).

Параметры загрузки для объекта применения двигателя типа 12ЧН15/16 приведены в табл. 1.

Эти параметры определены по осциллограммам прокручивания и пуска за время примерно 0,1 с с начала разгона двигателя. При этом, если бы процесс разгона заканчивался при частоте вращения  $120 \text{ мин}^{-1}$ , то пуска бы двигателя не произошло, поскольку минимальная пусковая частота вращения двигателя находится значительно выше.

В соответствии с программой испытаний было проведено 20 опытов при температурах

окружающего воздуха плюс 5, минус 5 и минус  $20^\circ\text{C}$ . Результаты испытаний сведены в табл. 2. В процессе прокручивания двигателя при температуре окружающего воздуха минус  $20^\circ\text{C}$  без загрузки и с загрузкой устройства имитации давлением 14 МПа пиковая величина тока



**Рис. 2. Характеристика стартера**

Таблица 1

Параметры загрузки для объекта применения двигателя типа 12ЧН15/16

$t, ^\circ\text{C}$	Частота вращения коленчатого вала, $\text{мин}^{-1}$			
	120		1000	
	$N_{\text{пр}}, \text{кВт}$	$p_n, \text{МПа}$	$N_{\text{пр}}, \text{кВт}$	$p_n, \text{МПа}$
16	1,47	6,4	17,65	9,2
5	1,74	7,6	80,15	10,9
минус 5	1,99	8,6	91,18	12,4
минус 20	2,35	10,2	108,09	14,7

Таблица 2

Режимы испытаний двигателя 12ЧН15/16

№ опыта	Температура окруж. воздуха, $^\circ\text{C}$	Способ пуска	Частота вращения кол. вала, $\text{мин}^{-1}$	Давление загрузки при частоте вращения двигателя, $p_n, \text{МПа}$		Средства облегчения пуска	Общая продолжительность пуска, с
				$n_{\text{дв}} = 120 \text{ мин}^{-1}$	$n_{\text{дв}} = 1000 \text{ мин}^{-1}$		
1	-20	Стартер	160	10,2	14,6	ПВВд+ЭПВВ	400
2	-20	Стартер	170	10,5	13,5	ПВВд+ЭПВВ	398
3	-5	Стартер	200	8,2	11,5	ПВВд	390
4	-5	Стартер	205	8,2	12,2	ПВВд	390
5	+5	Воздух	182	—	10,5	ПВВк	280
6	+5	Воздух	190	—	11,8	ПВВк	280
7	+5	Стартер	242	7,9	10,5	ПВВк	280
8	-5	Стартер	210	8,6	12,0	ПВВд	390
9	-5	Стартер	205	11,2	12,7	АП+ПВВд+ЭПВВ	630
10	-20	Стартер	170	10,9	14,2	ПВВд+ЭПВВ	400
11	-20	Стартер	160	10,8	13,9	АП+ПВВд+ЭПВВ	633
12	-20	Стартер	162	10,1	14,1	АП+ПВВд+ЭПВВ	635
13	-20	Комб.	230	10,8	14,0	ПВВд+ЭПВВ	402
14	-20	Комб.	240	10,2	14,1	ПВВд+ЭПВВ	400
15	-20	Стартер	170	10,4	—	—	-
16	-5	Комб.	280	10,6	14,0	ПВВд	390
17	-20	Стартер	180	—	—	—	-
18	-20	Стартер	164	12,4	—	—	-
19	-20	Комб.	230	10,2	14,1	ПВВд+ЭПВВ	392
20	-20	Комб.	235	10,8	14,8	АП+ПВВд+ЭПВВ	630

Принятые обозначения: АП – аппаратура подогрева; ПВВд – ПВВ, работающий по длинному циклу; ПВВк – ПВВ, работающий по короткому циклу; ЭПВВ – электрический ПВВ; комб. – комбинированный способ пуска (электростартером и воздухом).

не меняется, находясь на уровне 2100 А. Это подтверждает то обстоятельство, что в начале страгивания вала двигателя пиковую величину момента сопротивления в основном формирует момент инерции движущихся масс, приведенный к оси коленчатого вала двигателя.

Применение комбинированного способа пуска двигателя приводит к повышению мощности пусковой системы в сравнении с использованием только электростартерной, о чем свидетельствует повышение установившейся средней скорости прокручивания на 60...70 мин<sup>-1</sup>, в то же время имеет место охлаждение воздушного заряда [4, 5]. Поэтому целесообразность использования сжатого воздуха при прокручивании двигателя после его разгона следует определять экспериментально.

Следует отметить, что при электростартерном пуске величина пикового тока в значительной степени определяется состоянием аккумуляторных батарей и практически не зависит от вязкости масла. При комбинированном пуске процесс страгивания и разгона двигателя осуществляется стартером и сжатым воздухом, что позволяет преодолевать относительно большие моменты сопротивления. Коэффициент срабатывания воздушных баллонов составляет при этом 35 %.

При установившемся режиме прокручивания без загрузки устройства имитации средняя величина тока стартера составляет 790 А, что соответствует моменту сопротивления 883 Н·м при средней частоте вращения 180 мин<sup>-1</sup>. Загрузка двигателя предлагаемым устройством с давлением на выходе насоса  $p_n = 14$  МПа определяет среднюю величину тока 880 А (момент сопротивления 970 Н·м), что на 9 % выше, чем без загрузки. Скорость прокручивания вала двигателя стартером снижается при этом до 164 мин<sup>-1</sup>. Такое высокое давление загрузки свидетельствует о том, что система пуска двигателя только электростартером с питанием от новых аккумуляторных батарей со степенью зарядки 80...90 % имеет существенный запас мощности.

### Выводы

По результатам выполненного исследования разработано устройство, имитирующее сопротивление прокручиванию коленчатого вала со стороны элементов трансмиссии объекта применения, предложена методика проведе-

ния пусковых испытаний двигателя с данным устройством в климатической камере и способ его регулирования.

В ходе пусковых испытаний форсированного двигателя с пониженной степенью сжатия типа 12ЧН15/16 в климатической камере подтверждена работоспособность и эффективность устройства нагружения и выявлено, что:

- момент страгивания коленчатого вала при разгоне двигателя не зависит от загрузки двигателя и вязкости масла (в пределах температур окружающего воздуха при испытаниях), а определяется моментом инерции вращающихся масс;
- при прокручивании дизеля давление загрузки обеспечивается практически одновременно с началом страгивания коленчатого вала двигателя;
- загрузка насоса предлагаемого устройства давлением 14 МПа приводит к увеличению момента сопротивления прокручиванию коленчатого вала при температуре окружающего воздуха минус 20°C на 9 % (с 883 до 970 Н·м);
- при температуре окружающего воздуха 5°C с применением ПВВ с работой по короткому циклу пуск двигателя обеспечивается с 1-ой попытки;
- при температуре окружающего воздуха минус 5°C пуск двигателя обеспечивается с 1-ой попытки;
- с применением ПВВ с работой по длинному циклу;
- с применением АП, ПВВ с работой по длинному циклу и ЭПВВ;
- при температуре окружающего воздуха минус 20°C пуск двигателя обеспечивается с 1-ой попытки;
- с применением АП, ПВВ с работой по длинному циклу и ЭПВВ;
- с применением ПВВ с работой по длинному циклу и ЭПВВ;
- следует продолжить исследования по совершенствованию методов пусковых испытаний дизелей с реализацией следующих рекомендаций:
- воссоздание полной имитации момента инерции элементов трансмиссии;
- непосредственное определение момента сопротивления прокручиванию двигателя с учетом элементов трансмиссии использованием балансирного крепления устройства нагружения.



Результаты выполненной работы были внедрены ООО «ЧТЗ-Уралтрак» при создании новых моделей форсированных дизелей и могут быть использованы заводами-производителями поршневых двигателей внутреннего сгорания различного назначения, научно-исследовательскими организациями, конструкторскими бюро, высшими учебными заведениями.

### Литература

1. Николаев Л.А., Сташкевич А.П., Захаров И.А. Системы подогрева тракторных дизелей при пуске. М.: Машиностроение, 1977. 191 с.
2. Микулин Ю.В. Пуск холодных двигателей при низкой температуре. М.: Машиностроение, 1971. 216 с.
3. Карпенко В.Г. Зимняя эксплуатация колесных и гусеничных машин. М.: Военное издание Министерства обороны СССР, 1958. 254 с.
4. Байков Б.П., Баранов С.М., Ваншейдт В.А. Дизели: Справочник / Под ред. В.А. Ваншейдта. М., Л.: Машиностроение, 1964. 600 с.
5. Роднов К.В. Способы запуска ДВС в зимних условиях // Научный сборник ЧВВАКИУ. Челябинск, 2007. Вып. 10. С. 223–230.

### References

1. Nikolaev L.A., Stashkevich A.P., Zakharov I.A. Sistemy podogreva traktornykh dizeley pri puske [Heating systems of tractor diesel engines at start-up]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, 191 p.
2. Mikulin Yu.V. Pusk kholodnykh dvigateley pri nizkoy temperature [Engine cold start at low temperatures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971, 216 p.
3. Karpenko V.G. Zimnyaya ekspluatatsiya kolesnykh i gusenichnykh mashin [Winter operation of wheeled and tracked vehicles]. Moscow, Voennoe izdanie Ministerstva oborony SSSR Publ., 1958, 254 p.
4. Baykov B.P., Baranov S.M., Vansheydt V.A. Dizeli: Spravochnik [Diesel engines: Handbook]. Pod red. V.A. Vansheydta. Moscow, Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1964, 600 p.
5. Rodnov K.V. Ways to start internal combustion engine in winter conditions. Nauchnyy sbornik ChVVAKIU [Scientific publication of Chelyabinsk Higher Military Automobile Command-Engineering School]. Chelyabinsk, 2007, Vyp. 10, pp. 223–230 (In Russ.).

## THE METHOD OF SIMULATING THE LOADING OF BOOSTED DIESEL ENGINE DURING START-UP AT LOW AMBIENT TEMPERATURES

Ph.D. V. N. Bondar, Dr.Eng. V. S. Kukis, Dr.Eng. A. A. Malozyomov  
South Ural State University (National Research University)  
+7 951 524-25-48, idem37@mail.ru\

*The paper discusses the method of simulating the loading of boosted diesel engine during start-up at low ambient temperatures. To improve the reliability of the experimental evaluation of the results of diesel qualities the device simulating resistance to crankshaft turn over from the side of transmission elements of object was developed. The device provides the ability to control and change the moment of resistance to crankshaft turn over. The method of start-up testing of high performance engine with the device in a climatic chamber was developed. The engine is equipped with prior-start preparation and start-up facilitation systems. Loading parameters for type 12ChN15/16 engine object. In accordance with the test program 20 experiments were conducted at ambient temperatures of 5, minus 5 and minus 20°C. The results of experimental studies confirmed the effectiveness and adequacy of the proposed method. It was revealed that crankshaft breakaway torque during engine acceleration does not depend on load of engine and oil viscosity (in the range of ambient temperatures during testing) and is determined by moment of inertia of the rotating masses. During diesel turn over load pressure is provided almost simultaneously with the start of engine crankshaft breakaway. Loading of device pump by pressure of 14 MPa leads to an increase of resistance to crankshaft turn over moment at an ambient temperature of minus 20°C to 9% (from 883 to 970 N·m). According to the results of testing the recommendations for further improvement of the device to simulate loading of boosted diesel engine during start-up at low ambient temperatures were given.*

**Keywords:** diesel, engine starting characteristics, testing, climatic chamber, loading device.