

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПУСКОВЫХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЗЕЛЯ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА

*Н.Н. Патрахальцев, д.т.н., проф.; Российский университет дружбы народов  
И.А. Соболев, к.т.н.; ООО «Айтиси Авто Русь»  
С.А. Казаков, магистр; Российский университет дружбы народов*

Представлены результаты исследования возможностей улучшения пусковых и динамических качеств «холодного» дизеля в условиях низких температур окружающего воздуха. Для повышения эффективности режимов пуска и снижения выбросов белого дыма предложено впрыскивать в цилиндр легковоспламеняющуюся жидкость в смеси с дизельным топливом, а также увеличивать время прогрева путем отключения части цилиндров. Предложен способ управления режимами пуска и разгона по сигналам углового положения момента начала воспламенения.

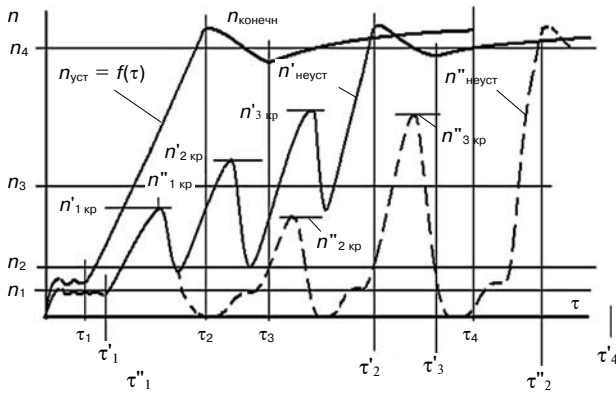
В России более 80 % территории находится в зоне холодного климата. Эксплуатация дизелей в таких условиях приводит к снижению показателей эффективности работы установок и машин. Так, при температурах окружающего воздуха от  $-20$  до  $-30$  °С рекомендуется снижать рабочие нагрузки на 25 %, а при температуре от  $-30$  до  $-40$  °С — даже на 50 % [1]. Как отмечается Ассоциацией автомобильных инженеров, большинство автомобилей с дизельными двигателями при температурах ниже  $-35$  °С теряют работоспособность [2]. К сожалению, большинство серийно выпускаемых отечественных автотракторных дизелей не оснащаются специальными средствами для повышения эффективности их работы при низких температурах. В условиях эксплуатации машины часто хранятся на открытых площадках или в закрытых, но не отапливаемых помещениях.

Особые проблемы в эксплуатации возникают при пуске «холодных» дизелей в условиях низких температур окружающего воздуха. Под «холодным» понимается дизель, у которого температуры блока цилиндров, охлаждающей жидкости, подшипников коленчатого вала, масла, топлива, аккумуляторной батареи и т. д. равны температуре окружающей среды. Холодный пуск осуществляется при отсутствии средств предпусковой подготовки (например предварительного разогрева перед пуском) или при отсутствии времени на проведение разогрева (экстренный пуск) и т. д.

Причинами затрудненности холодных пусков при низких температурах являются большой момент сопротивления прокручивания вала, низкое качество распыливания топлива, плохая воспламеняемость горючей смеси, что проявляется в неустойчивости режимов пуска и разгона [3]. Если высокое сопротивление прокручиванию вала может быть снижено применением соответствующих загущенных масел и использованием пусковых устройств повышенной мощности, то остаются проблемы воспламеняемости горючей смеси в первых циклах пуска–разгона, а также сохраняется вероятность неустойчивого пуска.

Неустойчивость пуска–разгона проявляется в том, что даже после успешных воспламенений топлива в цилиндрах и начале пуска–разгона дизель, достигнув некоторой критической частоты вращения  $n_{1\text{кр}}$  (рис. 1), совершает выбег вплоть до остановки. В других случаях остановки не происходит, так как при некоторой пониженной частоте вращения вновь появляются вспышки, происходит разгон до некоторой более высокой критической частоты вращения  $n_{2\text{кр}}$ . Процессы выбегов–разгонов без остановки протекают многократно и сопровождаются повышенным выбросом белого дыма. Считается, что пуск является успешным, если после не более чем трех попыток пуска дизель в течение заданного времени вышел на режим прогрева и стабильной работы.

Качество воспламенения топлива в цилиндре дизеля характеризуется периодом задержки воспламенения  $\tau_i$ . Этот период зависит от температуры, давления в камере сгорания, качества смесеобразования, качества топливоподачи, энергии активации смеси, а также от времени, располагаемого на подготовку к самовоспламенению, а следовательно — от частоты вращения вала дизеля. При анализе процессов самовоспламенения используется понятие (термин) «угол начала сгорания»  $\varphi_{\text{нач. сг}}$ , который зависит как от времени задержки воспламенения, так и от скоростного режима дизеля. При чрезмерно быстром разгоне дизеля после пуска этот угол достигает критического значения  $\theta_{i\text{кр}}$  (рис. 2) и вспышки прекращаются, происходит



**Рис. 1. Схемы протекания устойчивого и неустойчивых пусков:**

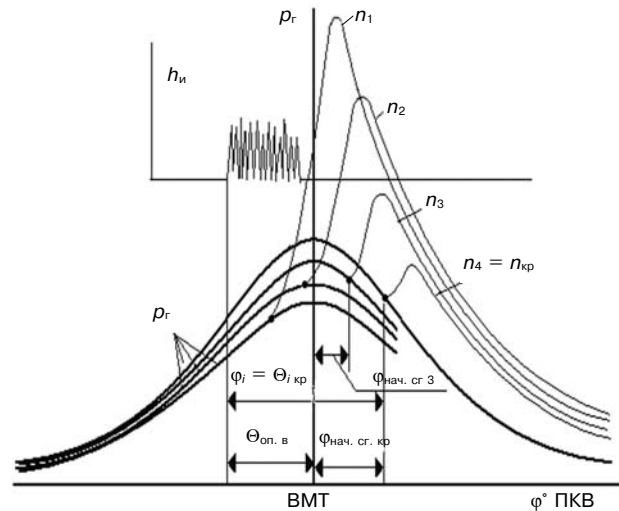
$n_{уст} = f(\tau)$ ,  $n'_{неуст} = f(\tau)$ ,  $n''_{неуст} = f(\tau)$  — характеристики устойчивого и неустойчивых пусков в функции времени;  $\tau_1$ ,  $\tau'_1$ ,  $\tau''_1$  — время прокрутки вала пусковым устройством соответственно при устойчивом (прогретый двигатель) и неустойчивых (холодных) пусках;  $\tau_1-\tau_2$ ,  $\tau'_1-\tau'_2$ ,  $\tau''_1-\tau''_2$  — периоды разгонов до начала работы регулятора частоты вращения (рейка находится на упоре максимальной подачи);  $\tau_2-\tau_3$ ,  $\tau'_2-\tau'_3$ ,  $\tau''_2-\tau''_3$  и т. д. — периоды разгонов с одновременным уменьшением подачи топлива регулятором до положения холодного хода или иного заданного режима;  $\tau_3-\tau_4$ ,  $\tau'_3-\tau'_4$  — период прогрева дизеля;  $n'_{1\text{кр}}$ ,  $n'_{2\text{кр}}$ ,  $n'_{3\text{кр}}$ ,  $n''_{1\text{кр}}$ ,  $n''_{2\text{кр}}$ ,  $n''_{3\text{кр}}$  — критические частоты вращения при неустойчивых пусках;  $n_1$ ,  $n_2$  — диапазон пусковых частот;  $n_3$  — частота выключения пускового устройства;  $n_4$  — частота срабатывания регулятора

выбег, проявляется неустойчивый процесс пуска-разгона.

Следовательно, для того чтобы снизить вероятность появления неустойчивого пуска, необходимо снизить интенсивность разгона после первых вспышек.

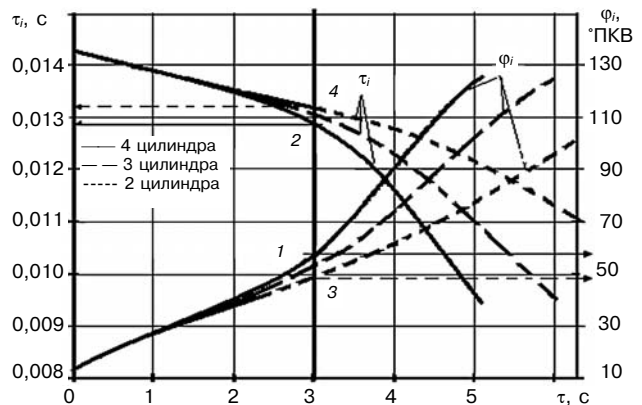
Уравнение динамического равновесия системы двигатель-потребитель показывает, что увеличить длительность  $\Delta t$  разгона на участке  $\Delta n$  можно увеличением момента инерции установки  $I_{л.уст}$ , увеличением нагрузки  $M_c$  и снижением развиваемого двигателем крутящего момента  $M_e$ , т. е.  $\Delta t = (I_{л.уст} \cdot \pi/30 \cdot \Delta n)/(M_e - M_c)$ . Увеличение момента инерции или нагрузки при пуске нецелесообразно. Снижение  $M_e$  за счет уменьшения цикловой подачи топлива во всех цилиндрах недопустимо, так как это может привести к остановке двигателя. Поэтому для снижения динамики разгона в работе применено изменение крутящего момента дизеля отключением части цилиндров.

На рис. 3 показаны результаты определения периодов задержки воспламенения и соответствующих им углов ПКВ при изменении интенсивности разгона дизеля Д-240 (4Ч11/12,5) за счет отключения части цилиндров. При этом угол опережения впрыска топлива при пуске оставался постоянным  $\theta_{оп.в} = 10$  град ПКВ до ВМТ. Дизель Д-240 (4Ч11/12,5), работал в мо-



**Рис. 2. Индикаторные диаграммы четырех последовательных циклов пуска-разгона «холодного» дизеля:**

$n_1 < n_2 < n_3 < n_4$  — последовательное возрастание частоты вращения при пуске-разгоне;  $h_{и}$  — ход иглы форсунки при пуске (дробящий впрыск);  $\phi_i = \theta_i_{кр}$  — критический угол задержки воспламенения;  $n_{кр}$  — критическая частота вращения;  $\phi_{нач.сг.з}$ ,  $\phi_{нач.сг.кр}$  — углы начала сгорания при частоте  $n_3$  и критической;  $\theta_{оп.в}$  — угол опережения впрыска



**Рис. 3. Изменение периода задержки воспламенения в функции времени  $\tau_i$  и угла ПКВ  $\phi_i$  при разгоне после пуска дизеля из холодного состояния**

розильной камере НТЦ ММЗ при температуре  $-25^\circ\text{C}$  [4].

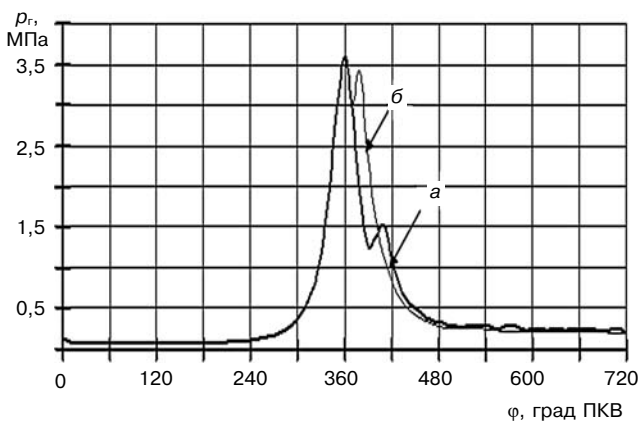
Отключение двух цилиндров позволяет, например, к третьей секунде разгона после холодного пуска уменьшить угол начала сгорания от 50 до 40 град ПКВ после ВМТ. Критический угол начала сгорания (порядка 45 град ПКВ после ВМТ) достигается при работе на двух цилиндрах после четвертой секунды разгона, а на четырех цилиндрах — после третьей. Таким образом, метод отключения цилиндров позволяет увеличить время работы дизеля до достижения критической для работающих цилиндров частоты вращения. При этом работающие цилиндры дизеля прогреваются в большей степени, чем при

работе всех цилиндров, а следовательно, критическая частота вращения увеличивается.

Повышение качества самовоспламенения топлива во многих случаях достигается добавкой к воздуху легковоспламеняющейся жидкости (ЛВЖ) [5]. Однако в работах [4, 6] было показано, что реализация такого метода нередко (обычно при нарушении регламентированных операций и условий проведения пуска) приводит к чрезмерно раннему (до ВМТ) воспламенению пусковой смеси, повышенным нагрузкам на детали дизеля, снижению эффективности пуска, а иногда даже к проворачиванию вала в обратном направлении. Для устранения этого недостатка было предложено впрыскивать ЛВЖ внутрь цилиндра вблизи ВМТ в виде смеси с дизельным топливом с помощью системы топливоподдачи с клапанами регулирования начального давления (РНД) [7]. Через клапаны РНД в периоды между циклами топливоподдачи осуществляется ввод ЛВЖ в дизельное топливо вблизи форсунки. Полученная таким путем смесь дизельного топлива и ЛВЖ в очередных циклах топливоподдачи подается в цилиндр дизеля.

Таким образом, поставленная в работе цель достигается путем улучшения самовоспламенения горючей смеси добавкой ЛВЖ к основному топливу и путем устранения вероятности неустойчивого пуска выбором рационального режима прогрева дизеля в процессе разгона после пуска, т. е. управлением процесса разгона до выхода на режим устойчивой работы.

На рис. 4 показано, что с быстрым ростом частоты вращения (работа на всех цилиндрах) от пусковой (порядка 130 об/мин) до некоторой повышенной (450 об/мин) угол начала сгорания смещается за ВМТ и в конечном итоге приближается к критическому, при котором воспламе-



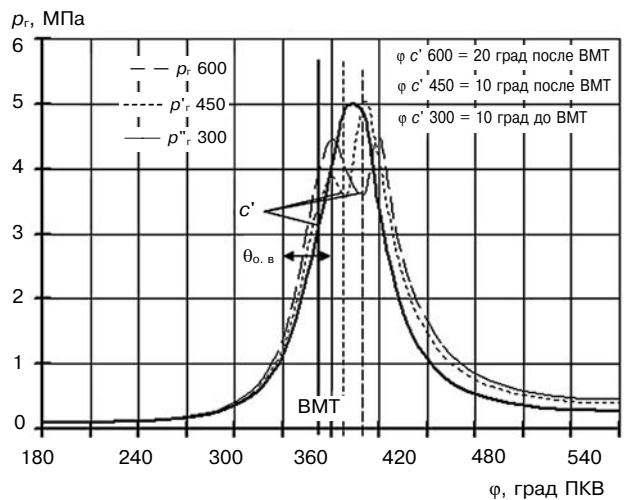
**Рис. 4. Индикаторные диаграммы циклов разгонов после холодного пуска до  $n = 450$  об/мин:**

*a* — быстрый разгон на всех цилиндрах, начало сгорания 30 град ПКВ после ВМТ; *b* — разгон замедлен выключением трех цилиндров, начало сгорания 20 град ПКВ после ВМТ

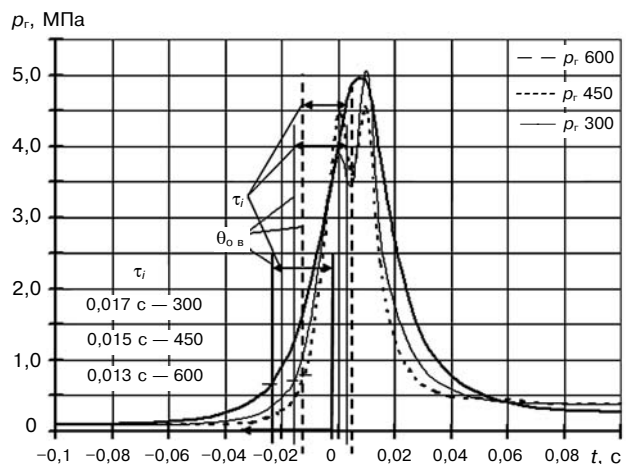
нение пропадает. Показано, что если замедлить разгон выключением трех цилиндров, то благодаря большому времени, располагаемому для прогрева, и уменьшению времени задержки воспламенения, начало сгорания хоть и происходит на линии расширения, но все же смещается ближе к ВМТ, т. е. вероятность достижения критической частоты вращения, а следовательно, и появления неустойчивости пуска устраняются.

На рис. 5 показано, что с ростом частоты вращения при разгоне после холодного пуска угол начала сгорания смещается все ближе к критическому углу, который составляет в данном случае 40–45 град ПКВ после ВМТ.

Для анализа влияния времени задержки воспламенения диаграммы построены в зависимости от текущего времени (рис. 6). Это дает возмож-



**Рис. 5. Индикаторные диаграммы рабочих циклов дизеля при достижении  $n = 300, 450$  и  $600$  об/мин после холодного ( $-15^\circ\text{C}$ ) пуска, с вводом ЛВЖ на всасывании (последующий разгон — на дизельном топливе):**  
*c'* — момент начала видимого сгорания;  $\theta_{оп.в}$  — угол опережения впрыска (30 град ПКВ до ВМТ)



**Рис. 6. Индикаторные диаграммы (см. рис. 5) построенные в функции времени**

ность наблюдать, что с ростом частоты вращения происходит уменьшение времени задержки воспламенения  $\tau_i$ , хотя угол начала сгорания (обозначенный как  $\varphi_c$ ) возрастает.

Для анализа возможностей управления интенсивностью разгона отключением цилиндров применена математическая модель, основанная на численном решении уравнения динамического равновесия дизеля. Необходимые для моделирования экспериментальные внешние скоростные характеристики дизеля (ВСХ) были получены испытаниями как на установившихся, так и на неустановившихся режимах (разгонах холодного и горячего дизеля). При разгонах регистрировалась текущая частота вращения вала во времени. Характеристики разгонов обрабатывались по методике, приведенной в работе [8].

Динамические ВСХ дизеля лежат ниже штатной статической ВСХ, полученной при работе на установившихся режимах. Потеря крутящего момента составляет 50 % и более в области минимальных частот вращения. Очевидно, что выключение части цилиндров также снижает крутящий момент, развиваемый дизелем, что и позволяет увеличить время, необходимое для достижения некоторой стабильной частоты вращения прогрева. На рис. 7 показано, что при разгоне дизеля на четырех, трех и двух цилиндрах критические частоты вращения составляют соответственно 520, 670 и 850 об/мин, а при работе на одном цилиндре критическая частота вращения не достигается.

При работе на всех цилиндрах после холодного пуска уже вблизи второй секунды разгона достигается критический угол начала сгорания (для данного дизеля 45 град ПКВ после ВМТ), что сопровождается прекращением вспышек, неу-

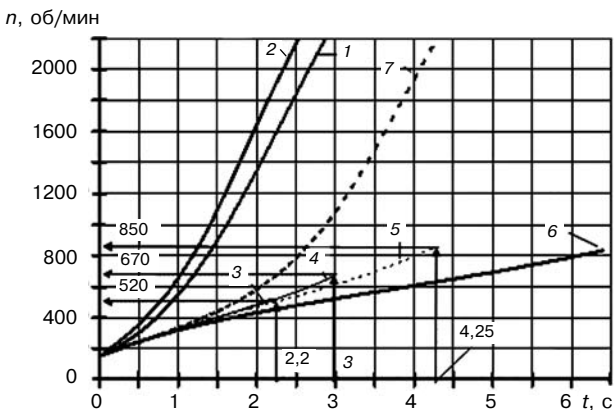


Рис. 7. Характеристики пусков–разгонов в разных вариантах:

1, 2 — «горячий» дизель на дизельном топливе и с ЛВЖ; 3, 4, 5, 6 — «холодный» дизель с ЛВЖ и разгон на четырех, трех, двух и одном цилиндрах; 7 — «холодный» с непрерывной подачей ЛВЖ

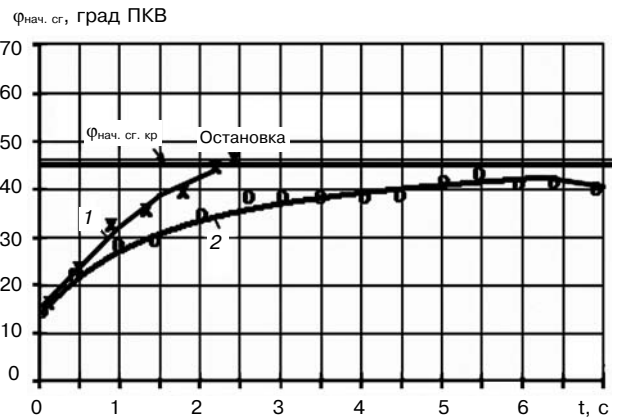


Рис. 8. Изменение угла начала сгорания ( $\varphi_{нач. сг}$  после ВМТ) при разгонах дизеля 4Ч11/12,5 после холодного пуска на всех цилиндрах 1 и на одном цилиндре 2

стойчивостью режима пуска, перерасходом топлива и приводит к повышенному выбросу белого дыма.

Данные рис. 8 показывают, что при разгоне на одном цилиндре угол начала сгорания приближается к критическому лишь к седьмой секунде, но критического значения не достигает и в дальнейшем разгоне проявляется тенденция к уменьшению угла начала сгорания, приближению его к ВМТ, а следовательно, исключению вероятности неустойчивого пуска.

Из результатов выполненного исследования следует, что процесс разгона после холодного пуска необходимо контролировать не только по частоте вращения, но и по величине угла начала сгорания.

В таблице показано, что холодный пуск с подачей ЛВЖ через клапан РНД обеспечивает следующие преимущества по сравнению с подачей в воздух ЛВЖ на всасывании:

- снижение в два–три раза жесткости сгорания  $(dp/d\varphi)_{max}$ ;
- своевременное начало сгорания  $\varphi_{нач. сг}$  вблизи ВМТ с достижением максимального давления цикла  $\varphi_c$ ;
- повышение почти в два раза индикаторного и эффективного крутящего момента ( $M_{i ср}$ ,  $M_{e ср}$ );
- понижение максимального удельного суммарного давления  $P_{уд. сум. max}$ ;
- существенное снижение максимального отрицательного крутящего момента  $M_{г кр}$  коленчатого вала.

В выполненной работе экспериментальными и расчетными методами показаны возможности повышения надежности, сокращения продолжительности холодного пуска–разгона, исключения вероятности неустойчивого пуска и снижения выбросов белого дыма в условиях низких температур.

**Сравнение параметров циклов  
в разных условиях реализации пусков и в номинальном режиме**

Параметры	Частота вращения (об/мин), режим, тепловое состояние			
	2200, ном., +20 °С	150, пуск, +20 °С, горячий	150, пуск, -15 °С, ЛВЖ + РНД	150, пуск, -15 °С, ЛВЖ, вс.
$(dp/dj)_{\max}$ , МПа/град ПКВ	0,1	0,15	0,2	0,46
$p_z$ , МПа	5,2	5,0	5,5	5,2
$\varphi_z$ , град ПКВ после ВМТ	5–10	10	10	-10 (т. е. до ВМТ)
$\varphi_{\text{нач ст}}$ , град ПКВ до ВМТ	15	10	15	20
$p_{\text{уд. сум. max}}$ , МПа	2,5	1,5	3,0	5,0
$M_{i \text{ кр}}$ , max/min	1201/(-480)	600/(-300)	920/(-260)	750/(-1300)
$M_{i \text{ ср}}$ , Нм	268	108	321	177
$M_{e \text{ ср}}$ , Нм	228	77	209	115
$p_i$ , МПа	0,71	0,20	0,85	0,47

В результате проведенного исследования разработан способ организации процесса пуска–разгона «холодного» дизеля в условиях низких температур окружающего воздуха. Этот способ включает подачу легковоспламеняющейся жидкости в цилиндры с помощью штатной системы топливоподачи, оснащенной клапанами ре-

гулирования начального давления; контроль допустимой интенсивности разгона по сигналам углового положения начала сгорания; регулирование интенсивности разгона включением–выключением цилиндров. Для контроля и управления процессом пуска–разгона целесообразно создавать автоматическую систему управления.

### Литература

1. Свод правил по проектированию и строительству. СП 12-104–2002. Механизация строительства, эксплуатация строительных машин в зимний период. URL: <http://stroy.databases.ru/Data1/11/11358/index.htm>
2. Долгих Б.Н., Шелконогов Е.С., Амелин Д.И. Обеспечение работоспособности автомобильной техники в условиях низких температур // Автомобили, специальные и технологические машины для Сибири и Крайнего севера; Материалы 59-й Международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ). — Омск, СибАДИ. — 2007. — С. 101–109.
3. Леонов О.Б., Патрахальцев Н.Н., Фомин А.В. Проблема неустойчивого пуска дизеля и пути ее решения // Известия вузов. Машиностроение. — 1999. — № 3. — С. 69–75.
4. Фомин А. В. Совершенствование режима пуска автотракторных дизелей воздействием на процессы топливоподачи: дис. ... канд. техн. наук. — М., 1990. — 123 с.
5. Купершмидт В.Л. Средства облегчения пуска двигателей в холодных условиях // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 2001. — № 1. — С. 30–32.
6. Харитонов В.В. Повышение эффективности пуска автотракторного дизеля в условиях низких температур окружающего воздуха: дис. ... канд. техн. наук. — М., 2006. — 186 с.
7. Патрахальцев Н.Н. Дизельные системы топливоподачи с регулированием начального давления // Двигателестроение. — 1980. — № 10. — С. 33–37.
8. Патрахальцев Н.Н., Сеницын А.К., Соловьев Д. Е. Испытания и диагностирование дизелей с использованием неустойчивых режимов их работы // Вестник РУДН. Сер. «Тепловые двигатели». — 2003. — № 2. — С. 11–13.