

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ДИЗЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГОРЬЯ НА СЖИЖЕННОМ НЕФТЯНОМ ГАЗЕ

*Н.Н. Патрахальцев, д.т.н. проф., Российский университет дружбы народов;
О.В. Камышников, к.т.н., Хосе Гальдос Гомез, магистр техн. и технологии, доцент
Национальный университет Сан Августина, Перу (UNSA)*

В условиях высокогорья (Перу) из-за разреженной атмосферы мощность дизеля снижается на 30 % при ухудшении показателей экологичности и дымности ОГ. В статье рассмотрены возможные методы и средства восстановления и улучшения показателей дизеля, в том числе при работе на смеси дизельного топлива и сжиженного нефтяного газа. Смесевое топливо подается в камеру сгорания дизеля штатной модернизированной топливной системой.

Основными источниками загрязнения окружающей среды в провинции Арекипа (Перу) являются автомобильный транспорт и промышленность. Проблема загрязнения воздуха осложняется топографическими особенностями расположения города Арекипа и провинции (окруженное горами плато, что затрудняет естественный ветровой воздухообмен). Предельно допустимые концентрации сажи в окружающем воздухе разработаны для нормальных условий эксплуатации, т. е. на уровне моря. Однако согласно последним исследованиям гигиенистов, токсичность сажи возрастает с ростом высоты над уровнем моря.

В Перу производится около 20 000 баррелей сжиженного нефтяного газа (ГСН) в месяц, который используется в автомобильных двигателях с принудительным зажиганием. С ростом числа заправок станций растут возможности использования ГСН в качестве топлива для дизелей. В частности, для Перу применение ГСН в дизелях со штатной системой топливоподачи [1] наиболее целесообразно при незначительной модернизации системы топливоподачи.

В провинции Арекипа давление окружающего воздуха составляет около 85 % от нормального, температура воздуха на высоте порядка 2000–2500 м несколько возрастает, достигая уровня 103 % от нормального, в результате чего плотность окружающего воздуха оказывается на 25 % ниже, чем в нормальных условиях, причем на 5 % ниже, чем в аналогичных условиях Европы. Это приводит к снижению на 3 % коэффициента наполнения цилиндров и на 27 % давления начала

сжатия. В конечном итоге уменьшается коэффициент избытка воздуха. В условиях высокогорья снижаются не только давление и температура конца сжатия, но и возрастает период задержки воспламенения. Все это приводит к снижению мощности дизеля до 30 %, экономичности на 22 %, росту выбросов вредных веществ, особенно дымности отработавших газов. Регулировка дизеля на постоянство состава смеси, т. е. уменьшение подачи топлива на величину порядка 25–30 %, не восстанавливают экономичности дизеля, индикаторный и эффективный КПД которого остаются ниже, чем на уровне моря.

На моторном стенде Университета дружбы народов были проведены испытания дизеля 2Ч8,5/11 в штатном исполнении при работе на дизельном топливе (рис. 1) и в условиях, когда за счет уменьшения подачи топлива на каждом скоростном режиме достигался состав смеси, эквивалентный тому, который соответствует на этом же режиме в нормальных условиях.

При работе дизеля на высоте с неизменной «равнинной» регулировкой (рис. 1, 2) примерно на 20 % снижается мощность при снижении коэффициента избытка воздуха на 30 %, и в 1,6–3,0 раз повышается дымность отработавших газов. Если провести регулировку дизеля, работающего на высоте, на состав смеси, соответствующей «равнинной» регулировке ($\alpha_n' = \alpha_0$), то его эффективная мощность ($P_{e.n}'$) снижается по сравнению с исходной «равнинной» ($P_{e.0}$) на 30–35 % при потере экономичности до 2–3 % по абсолютному значению. При этом уровень дымности отработавших газов несколько снижается на повышенных частотах вращения, но возрастает на 30 % при пониженных частотах. Таким образом, простая регулировка дизеля на условия высокогорья, путем сохранения неизменным (по сравнению с нормальными условиями) состава горючей смеси, не обеспечила компенсации потерь экономичности и дымности отработавших газов при очевидной потере мощности.

Для компенсации этих потерь в условиях высокогорья требуются специальные методы и средства организации рабочих процессов. В публикациях [2, 3] имитацией работы дизеля

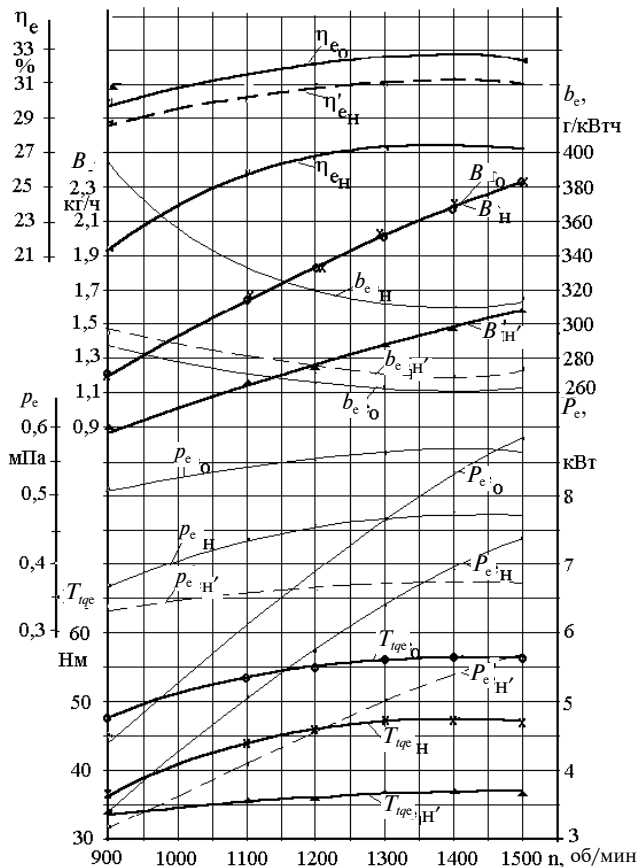


Рис. 1. Внешние скоростные характеристики дизеля 248,5/11:

«о» — нормальные условия на уровне моря; «н» — на высоте $H = 2500$ м над уровнем моря с неизменной «равнинной» регулировкой; «н'» — при работе на высоте с уменьшением подачи топлива до исходного («равнинного») состава смеси, соответствующих «равнинной» регулировке; T_{iqe} — эффективный крутящий момент; P_e — эффективная мощность; p_e — среднее эффективное давление; b_c — удельный эффективный расход топлива; η_e — эффективный КПД; B — часовой расход топлива.

типа Рикардо в высокогорных условиях показаны возможности частичной компенсации высокогорных потерь добавкой к топливу ГСН. По существу, предлагаемый метод относится к созданию газодизелей с внутренним смесеобразованием. Разработке таких процессов в нормальных условиях эксплуатации посвящены работы, где в камеру сгорания подавалась предварительно подготовленная смесь основного дизельного топлива и ГСН [4, 5]. При этом ГСН вводился в линию высокого давления топливной системы вблизи форсунки через клапан регулирования начального давления (РНД) [6]. Подача в дизель заранее подготовленной смеси дизельного топлива и ГСН (смесового топлива) улучшает показатели экономичности, эффективности, дымности отработавших газов. Однако метод сложен в организации, так как при подаче ГСН или его смеси с дизельным топливом через штатный

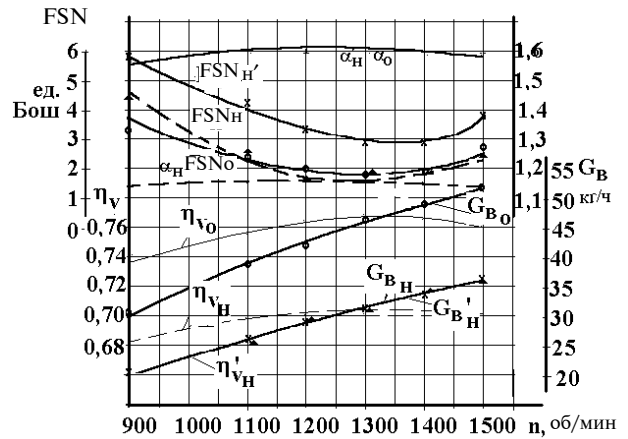


Рис. 2. Корректировка внешних скоростных характеристик дизеля 248,5/11:

«о» — при работе на уровне моря; «н» — в высокогорье с неизменной «равнинной» регулировкой; «н'» — с уменьшением подачи топлива до исходного («равнинного») состава смеси; G_v — часовой расход воздуха дизелем; h_v — коэффициент наполнения; α — коэффициент избытка воздуха; B — дымность отработавших газов

ТНВД возникает возможность парообразования в топливопроводах низкого и высокого давления в процессе топливоподдачи, повышается сжимаемость смесового топлива, появляются утечки газа в окружающую среду через зазоры в ТНВД и т. д. Способ подачи ГСН к штатной форсунке с помощью клапана РНД более оперативен, конструктивно менее сложен. Система топливоподдачи включает элементы штатной системы, источник с ГСН, фильтры ГСН и устройства аварийной защиты, клапан РНД, подключенный вблизи штатной форсунки. (Следует отметить, что по предложению МГТУ им. Баумана этот клапан очевидно более удачно назван клапаном импульсной подачи добавки к топливу. В нашей работе сохранена старая терминология, так как функцией клапана является не только ввод добавок к основному топливу, но и стабилизация начального давления в ТНВД перед очередными циклами топливоподдачи.) Узел клапана РНД включен вблизи форсунки через специальные элементы крепления. Клапан выполнен на базе нагнетательного клапана ТНВД. Подача ГСН в дизельное топливо осуществляется в топливопровод высокого давления между циклами впрыска. В этот период времени, при отсечке подачи топливным насосом и посадке нагнетательного клапана в седло, в линии высокого давления формируется волна разрежения. Подходя к клапану РНД, волна открывает его и ГСН под действием этого разрежения подается в топливопровод высокого давления, перемешиваясь с дизельным топливом. В очередных циклах топливоподдачи созданное таким образом смесовое топливо впрыскивается в дизель обычным порядком.

Анализ регулировочных характеристик топливной системы дизеля 2Ч8,5/11 с клапаном РНД показал, что в штатном состоянии топливной системы клапан РНД не обеспечивает ввод добавки в топливопровод высокого давления. Потребовалось увеличение длины топливопровода до 600 мм и ограничение хода клапана РНД величиной 0,4 мм, а также увеличение объема разгрузки нагнетательного клапана до 26 мм³, что позволило получить достаточные расходные характеристики ГСН через клапан.

Установка РНД на модернизированную топливную систему позволяет не только восстановить, но и повысить производительность системы топливоподачи на всех скоростных и нагрузочных режимах. При подаче через клапан РНД дизельного топлива повышение производительности системы составляло 20–40 %.

После отладки системы на дизельном топливе проведены исследования с подачей ГСН. Показано (рис. 3), что массовая доля расхода ГСН через клапан РНД (в случаях сохранения мощностной характеристики или сохранения состава смеси исходного «равнинного» состояния) составляет около 20–25 % от полного массового расхода дизельного топлива. Более важным представляется обеспечение доли (X_Q и X'_Q) и абсолютного значения тепла (Q), вводимого с ГСН ($Q^{ГСН}$ и $Q^{ГСН'}$). Показано, что по отношению ко всему количеству тепла, вводимому в цилиндры дизеля со смесевым топливом, она составляет от 20 до 22 % во всем диапазоне скоростных режимов при работе по внешней скоростной характеристике (ВСХ).

Испытания газодизеля с подачей в цилиндры ГСН проведены в следующих условиях (рис. 3, 4).

1. На всех скоростных режимах газодизель регулировался на получение крутящего момента ($T_{иге.н}$), который он развивал при работе по внешней скоростной характеристике на высоте в дизельном варианте с исходной «равнинной» регулировкой (следовательно, эта характеристика газодизеля является не внешней скоростной, а корректорной, т. к. положение рейки на каждом режиме подбиралось таким, чтобы обеспечить получение нужного крутящего момента, при этом расход ГСН определялся особенностью работы топливной аппаратуры и специальными средствами не регулировался).

2. На номинальном скоростном режиме двигатель регулировался на уровень дымности отработавших газов не более 2,3 ед. Бош подбором положения рейки (при автоматически получаемом расходе ГСН), т. е. не выше того, который двигатель имел на номинальном режиме в условиях Москвы. При этом на номинальных скоростных режимах расход дизельного топлива

составлял 1,7–1,8 кг/ч, а расход ГСН — около 0,4 кг/ч. Иначе говоря, с подачей ГСН в цилиндр вводилось около 20 % теплоты от всего введенного в двигатель тепла смесевого топлива. В этом варианте положение рейки ТНВД при дымности 2,3 ед. Бош фиксировалось как номинальное и далее снималась внешняя скоростная характеристика дизеля, т. е. без изменения положения рейки. При этом наблюдалось уменьшение мощности дизеля на номинальном скоростном режиме с 7,3 до 6,75 кВт, повышение от 1,14 до 1,21 коэффициента избытка воздуха, практически сохранилась экономичность дизеля, а дымность отработавших газов снизилась с 3,0 до указанного уровня 2,3 ед. Бош.

Сравнивая показатели дизеля при исходной регулировке с показателями газодизеля при одинаковых значениях крутящего момента ($T_{иге}$ и $T_{иге}^{ГН}$) (рис. 5), можно отметить следующее. Эффективность газодизеля ($\eta_{е.н}^{ГН}$) возросла на пониженных частотах вращения на 2 % и несколько сни-

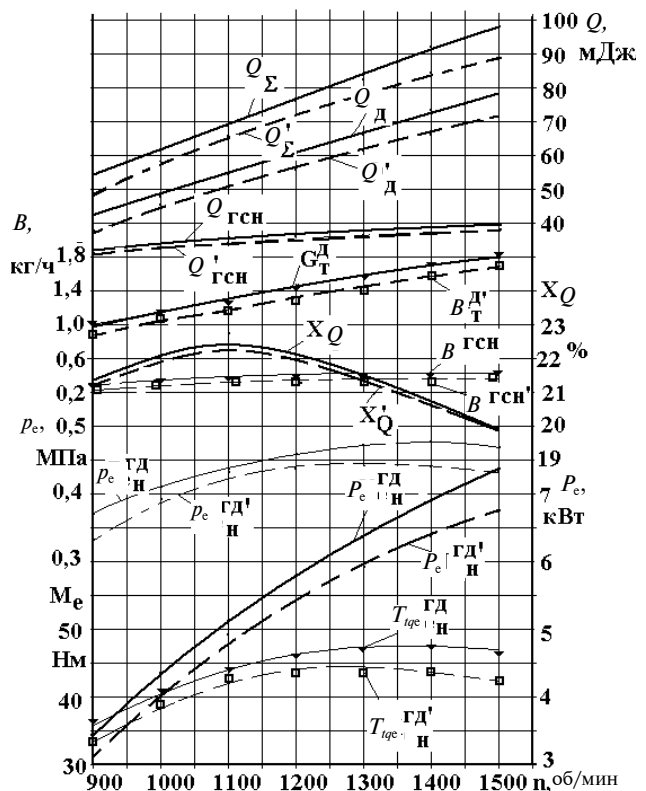


Рис. 3. Характеристики газодизеля с внутренним смесеобразованием на базе дизеля 2 Ч 8,5/11 при работе на высоте $H = 2500$ м над уровнем моря:

— добавка ГСН из условия сохранения характеристики дизеля $T_{иге}$ (индекс гд); - - - - - добавка ГСН при условии сохранения неизменной дымности ОГ на номинальном скоростном режиме на уровне $FSN = 2,3$ ед. Бош (индекс гд'); $G^{ГСН}$ и $G^{ГСН'}$ — часовые расходы ГСН; $B_{ГД}^a$ и $B_{ГД}^a$ — часовые расходы дизельного топлива; Q — часовой ввод тепла с дизельным топливом (д); с ГСН (гсн) и суммарный (Σ); X — доля тепла, введенного с ГСН

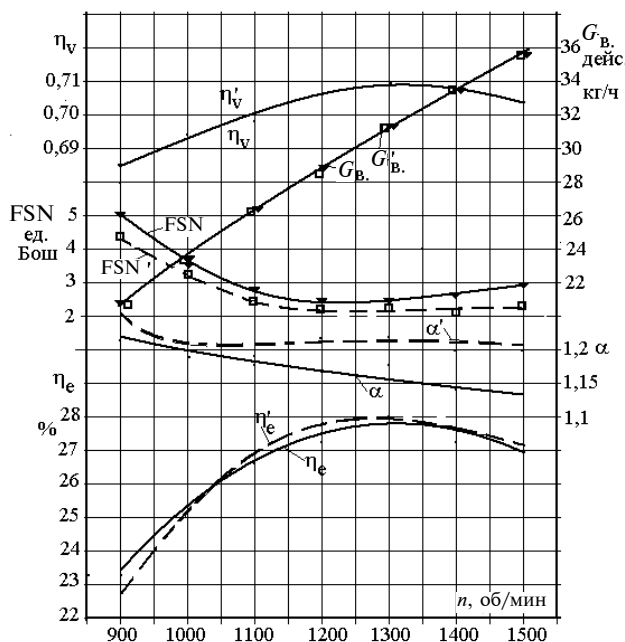


Рис. 4. Характеристики газодизеля с внутренним смесеобразованием при регулировках подачи ГСН на неизменную характеристику $T_{iqe.n}$ и неизменную дымность номинального режима FSN = 2,3 ед. Бош. Обозначения см. рис. 3

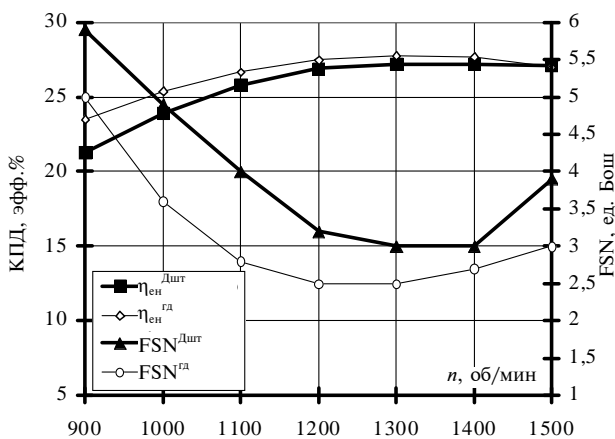


Рис. 5. Сравнение КПД (η_e) и дымности (FSN) ОГ дизеля со штатной «равнинной» регулировкой и газодизеля в высокогорье при условии равенства развиваемых крутящих моментов

зилась на номинальном режиме. Газодизель, как и дизель работает при обогащенном составе смеси. Дымность отработавших газов у газодизеля снижается на 10–30 % по сравнению с дизелем. Реализовать такую коррекционную скоростную характеристику из-за частых перемен положения рейки достаточно сложно. При работе газодизеля по внешней скоростной характеристике при условии ограничения дымности ОГ, свойственной нормальным условиям (рис. 3), крутящий момент газодизеля составляет 90–97 % от момента дизеля, а КПД практически сохраняется на неизменном уровне.

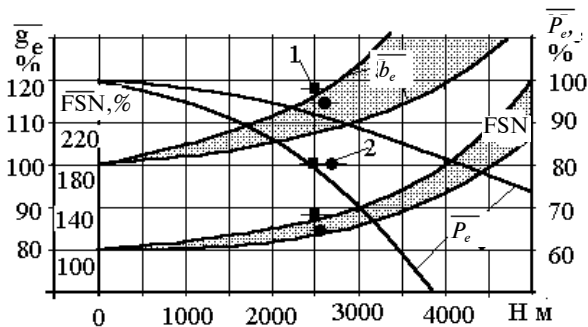


Рис. 6. Сравнение литературных данных (1) с результатами данного исследования (2), представленными как отношение показателя в высокогорье к его значению на уровне моря

На рис. 6 приведено сравнение литературных данных по изменению экономичности, эффективности и дымности отработавших газов дизелей с различной организацией рабочих процессов (разделенные и неразделенные камеры сгорания и т. д.) в условиях высокогорья с экспериментальными результатами данной работы. Из приведенного сравнения следует, что показатели дизеля хорошо коррелируются с показателями, полученными для вихрекамерных дизелей. Это является определенным подтверждением корректности результатов исследования. Показатели газодизеля с внутренним смесеобразованием являются более высокими по экономическим и экологическим качествам, чем показатели дизеля в условиях сохранения неизменной достижимой в этих условиях мощности дизеля.

По результатам выполненного исследования можно сформулировать следующие положения.

1. Исследованы метод и средства компенсации снижения мощности и экономичности, а также метод снижения дымности выбросов дизеля типа 2Ч8,5/11, эксплуатирующегося в условиях высокогорья.

2. Разработана система топливоподачи с клапанами регулирования начального давления малоразмерного быстроходного дизеля типа 2Ч8,5/11, обеспечивающая использование сжиженного нефтяного газа как добавки к основному дизельному топливу в целях изменения показателей рабочего процесса дизеля за счет изменением физико-химических свойств топлива. По существу, реализован метод организации газодизельного процесса с внутренним смесеобразованием путем подачи в цилиндры смесового топлива.

3. Дизель в исходной модификации, отрегулированный для работы в нормальных условиях, на высоте 2500 м над уровнем моря теряет около 17 % мощности, причем его дымность возрастает в 1,65 раза, а удельный расход топлива увеличивается на 20 %. При этом происходит снижение коэффициента избытка воздуха с 1,59 до 1,14.

4. Модернизация топливной аппаратуры, позволяет подавать в дизель через клапан РНД количество ГСН, эквивалентное 20–22 % всего тепла, вводимого в двигатель со смесевым топливом. Это необходимо для ограничения дымности газодизеля в условиях высокогорья на номинальном режиме на уровне дымности отработавших газов в условиях высокогорья на номинальном режиме на уровне, не превышающем 2,3 ед. Бош).

5. При перерегулировке дизеля на условия высокогорья по составу смеси, которую он имел

в нормальных условиях, номинальная мощность снижается на 35–40 % при одновременном уменьшении дымности до 2,1 ед. Бош, т. е. ниже, чем на номинальном режиме дизеля в нормальных условиях.

6. При реализации газодизельного рабочего процесса на высоте 2500 м, двигатель может развивать мощность, которую он имел в этих же условиях при неизменной «равнинной» регулировке, при практически той же экономичности, но с пониженной в 1,35 раза дымностью ОГ на номинальном режиме.

Литература

1. Патрахальцев Н.Н. Аппаратура для газодизельного процесса // Автомобильная промышленность. 1988, — № 7. — С. 16–17.

2. Ластра Луис, Качо Г. Л., Патрахальцев Н.Н. Альтернативный метод повышения эффективности работы дизеля в условиях высокогорья форсировкой рабочего процесса по составу смеси // Известия ВУЗов. — Машиностроение. 1995. — № 4–6. — С. 38–45.

3. Луис Ластра, Патрахальцев Н.Н. Разработка альтернативных методов организации рабочего про-

цесса дизеля в условиях высокогорья // Двигателестроение. — 1993. — № 5. — С. 12–14.

4. Мамедова М. Д. Работа дизеля на сжиженном газе. — М.: Машиностроение. — 1980. — 60 с.

5. Патрахальцев Н.Н., Куличков В.И., Камышников О.В. и др. Возможности экономии дизельного топлива при организации дизельного процесса с внутренним смесеобразованием // Тракторы и сельхозмашины. — 1990. — № 10. — С. 8–9.

6. Патрахальцев Н.Н. Системы топливоподачи с регулируемым начальным давлением // Двигателестроение. — 1980. — № 8. — С. 32–35.



**22 августа 2006 г. трагически погиб
заместитель начальника**

**Военного инженерно-технического университета, доктор
технических наук, профессор, Почетный энергетик РФ,
член редакционной коллегии журнала «Двигателестроение»
полковник**

Александр Николаевич Агафонов

Военная служба, преподавательская и научная деятельность Агафопова Александра Николаевича была связана с разработкой и созданием теплоэнергетического оборудования для объектов военной инфраструктуры и вооруженных сил России. Его научная специализация, профессиональный и научный рост формировались на кафедре дизельных энергетических установок (ДЭУ) Военно-инженерного технического университета (ВИТУ) под руководством известных военных ученых.

Впоследствии Агафонов А.Н. возглавил сначала кафедру ДЭУ, а затем, после успешной защиты докторской диссертации, и научно-преподавательскую работу университета. Доктор технических наук, профессор Агафонов А.Н. завершил работу над большим количеством научных трудов и воспитал многих учеников и последователей. Его военная служба и профессиональная деятельность отмечена многими правительственными наградами.

Редакция журнала «Двигателестроение» и коллектив ВИТУ, извещая о трагической гибели полковника Агафопова А.Н., приносит соболезнования его родным, близким и коллегам по работе и военной службе.