

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

**Д.Я. Носырев, Л.С. Курманова, С.А. Петухов, А.В. Муратов,
М.П. Ерзамаев**

**Самарский государственный университет путей сообщения,
Самарская государственная сельскохозяйственная академия, г. Кинель**

Рассмотрены вопросы снижения выбросов вредных веществ энергетическими установками железнодорожного транспорта. Установлено, что автономные локомотивы являются основным источником экологических проблем связанных с выбросом загрязняющих веществ. Приведены основные направления по экологической безопасности автономных локомотивов в условиях эксплуатации. На основании результатов проведенных исследований, а также расчетов совокупного показателя вредности выхлопных газов автономных локомотивов установлено, что наиболее перспективными для решения экологических проблем является применение в качестве топлива природного газа.

Ключевые слова: снижение вредных выбросов, железнодорожный транспорт, экологические проблемы, метанол, этанол, ресурсосбережение, инновационные технологии, экологический контроль, малотоксичные двигатели, экологически чистое топливо, качественное масло, оксиды углерода, дымность, природный газ

Environmental Efficiency of Using Alternative Types of Fuel in Power Facility of Railway Transport

D.Ya. Nosyrev, L.S. Kurmanova, S.A. Petukhov, A.V. Muratov, M.P. Erzamaev

**Samara State University of Routes of Communications, 443066 Samara, Russia,
Samara State Agricultural Academy, 446442 Kinel, Russia**

The issues of reducing emissions of harmful substances by power facilities of railway transport are considered. It is established self-consistent railroad engines are the main source of environmental problems associated with the emission of pollutants. The main directions for the environmental safety of self-consistent railroad engines under operating conditions are given. Based on the results of the research conducted and the calculations of the cumulative indicator of the exhaust emissions of self-consistent railroad engines, it was found that the use of natural gas as a fuel is the most promising for solving environmental problems.

Keywords: reduction of harmful emissions, railway transport, environmental problems, methanol, ethanol, resource saving, innovative technologies, environmental control, low-toxic engines, environmentally friendly fuel, high-quality oil, carbon oxides, smoke, natural gas

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-02-19-23

Восновных направлениях Государственной программы Российской Федерации "Охрана окружающей среды" на 2012–2020 гг. в разделе ожидаемых результатов отмечена необходимость разработки и внедрения экологически эффективных инновационных технологий, обеспечивающих снижение удельных показателей выбросов и сбросов вредных (загрязняющих) веществ [1].

Вопрос снижения выбросов вредных веществ особо остро

стоит перед железнодорожным транспортом в силу того, что при доле потребления дизельного топлива автономными локомотивами 12,6 млн т в год в атмосферу выбрасывается 1,9 млн т вредных веществ.

Важность решения задач защиты атмосферы от вредных выбросов автономными локомотивами определяется тем, что к наиболее распространенным загрязнителям от указанных транспортных средств относятся: оксиды углерода (СО и СО₂) —

около 49 тыс. т; оксиды азота (NO_x) — около 176 тыс. т; углеводороды C_nH_m — около 23 тыс. т; сажа С — около 12 тыс. т и дымность выхлопа (D). Дымность выхлопа возрастает практически до 100 % при работе маневровых тепловозов на переходных (неустановившихся) режимах [2].

Средний возраст парка автономных локомотивов, основной частью которого являются маневровые и магистральные тепловозы, составляет более 25 лет,



Рис. 1. Виды альтернативных топлив для двигателей внутреннего сгорания

Fig. 1. Types of alternative fuels for internal combustion engines

что, в свою очередь, позволяет рассматривать его как основную угрозу железнодорожного транспорта экологической безопасности России.

Кроме того, проблема усугубляется низким качеством топлива и масел, ГОСТов (по сравнению с EURO стандартами), отсутствием региональных норм на выбросы токсичных компонентов с отработавшими газами, недостатком приборов экологического контроля и оборудования должной номенклатуры и т.д.

В законодательстве до сих пор отсутствуют положения, стимулирующие разработку и внедрение малотоксичных двигателей, средств снижения токсичности отработавших газов и других экологически чистых видов топлив, масел необходимого качества. До сих пор не разработаны действенные правовые и экономические рычаги, заставляющие природопользователей нести ответственность за повышенные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Производственная база для технического обслуживания и ремонта не соответствует современным требованиям, в том числе и в области диагностики и контроля токсичности отработавших газов двигателей.

Наиболее остро проблема обеспечения экологической безопасности тягового автономного состава стоит в условиях мегаполиса (места размещения локомотивных депо и станций, крупных предприятий), где преимуще-

ственно эксплуатируются маневровые тепловозы, что, в свою очередь, сопровождается высоким уровнем выбросов токсичных веществ.

Учитывая эту тревожную тенденцию, в работе рассматриваются вопросы, связанные с повышением экологической безопасности, на примере маневровых тепловозов ЧМЭЗ, общий процент которых от общего парка маневровых локомотивов России составляет около 60 %.

Состав отработавших газов дизелей тепловозов, так же как и любых других типов энергетических установок, в большой мере обуславливается видом используемого топлива. При этом под токсичностью топлива следует понимать его эксплуатационные свойства, характеризующие воздействие самого топлива и продуктов его сгорания и разложения на человека и окружающую среду. Поэтому различие эксплуатационных свойств топлива, т.е. применение различных видов топлива, в энергетических установках автономных локомотивов является предметом данного исследования.

Проводимый в настоящее время поиск экологически чистых топлив на железнодорожном транспорте заставляет различных исследователей искать наиболее перспективные комбинации топлив и их новые виды [3–5].

Анализ современных мероприятий в вопросах снижения токсичности отработавших газов энергетическими установками

автономных локомотивов с помощью альтернативных видов топлив позволил классифицировать их следующим образом (рис. 1).

Наиболее широко рассматривается перспектива применения сжиженного нефтяного газа (СНГ), сжиженного и компримированного природных газов (СПГ и КПГ соответственно) в качестве моторного топлива для тягового автономного подвижного состава.

К настоящему времени доказана возможность реализации в двигателях железнодорожного транспорта эффективных и малотоксичных рабочих процессов при использовании в качестве топлива или его составляющей водорода (в газообразном или жидком состоянии) при внешнем и внутреннем смесеобразовании [6].

Метиловый и этиловый спирты, относящиеся к группе кислородсодержащих топлив, продолжают рассматриваться в качестве основных альтернативных топлив транспорта. По своим свойствам названные топлива более пригодны для использования в двигателях с принудительным воспламенением, но могут применяться и в дизелях [7].

Перечисленные выше топлива по праву считаются наилучшей альтернативой дизельному топливу, используемому на железнодорожном транспорте, однако, как говорилось выше, большая часть тепловозного парка устарела, поэтому внесение существенных изменений в их конструкцию нецелесообразно с точки зрения экономической эффективности.

Наиболее реальное и эффективное направление решения проблемы повышения экологичности железнодорожного транспорта — применение комбинированных видов топлив, т.е. топлив, состоящих из смеси альтернативного вида топлива и дизельного топлива. Такой путь решения данной проблемы перспективен, поскольку при использовании 5–30 % добавок к дизельному топливу можно практически не изменять конструкцию энергетических установок, используемых на автономных локомотивах.

Основные физико-химические и эксплуатационные свойства

альтернативных и традиционных топлив приведены в табл. 1.

Эффективность использования СНГ (C_3H_8), природного газа (метана CH_4), водорода (H_2) и метилового спирта (CH_3OH) в качестве добавки к дизельному топливу в локомотивных энергетических установках была оценена для дизеля K6S310DR тепловоза ЧМЭЗ с помощью имитационных моделей [8, 9] (табл. 2).

Результаты, приведенные в табл. 2, позволяют сделать вывод, что наиболее перспективным и не сложным в реализации является замещение дизельного топлива природным газом, способствующее наибольшему снижению выбросов оксида углерода CO , дымности D и незначительному увеличению (в пределах допустимых значений) выбросов оксидов азота NO_x .

Природный газ в настоящее время рассматривается как одно из наиболее перспективных моторных топлив. Его преимущества по сравнению с топливами нефтяного происхождения хорошо известны:

- высокое октановое число (120);
- более высокое по сравнению с бензином и дизельным топливом соотношение водород — углерод (4/1).

Основным компонентом природного газа является метан CH_4 , содержание которого достигает 98 % по объёму. Поэтому при его сгорании образуется примерно на 10 % меньше диоксида углерода CO_2 , чем при сжигании эквивалентного количества бензина и дизельного топлива.

Используя метан в качестве перспективного экологически чистого топлива на транспорте, можно достичь низких выбросов вредных веществ и обеспечить жесткие международные требования по экологии, недостижимые для двигателей, работающих на нефтяных топливах.

В связи с этим для применения метана на транспортных двигателях необходимо разработать систему подачи, смешивания и дозирования, обеспечивающую внутреннее смешивание с помощью автономного управления линиями подачи природного газа и дизельного топлива.



Рис. 2. Система подачи газомоторного топлива с внутренним смешиванием

Fig. 2. Gas engine fuel supply system with internal mixing

Таблица 1. Физико-химические и эксплуатационные свойства альтернативных и традиционных топлив

Table 1. Physico-chemical and operational properties of alternative and traditional fuels

Характеристика	Водород	Керосин	СНГ	Дизельное топливо	Метанол	Метан
Элементарный состав:						
С	–	0,853	0,18	0,87	0,375	0,75
Н	1	0,147	0,172	0,13	0,125	0,25
О	–	–	–	–	0,500	–
Плотность, $кг/м^3$ *	70,8/0,0899	800/–	542/–	820/–	790/–	415/–
Вязкость при 20 °С, $м^2/с$	–	$1,75 \cdot 10^{-6}$	–	$4-6,5 \cdot 10^{-6}$	$0,27 \cdot 10^{-6}$	–
Температура, К:						
начала кипения	20,2	423	–42	–	338	111
конца кипения	20,2	523	–	–	–	–
воспламенения	823–873	708	415	593–653	741	923–973
Пределы воспламенения, %:						
нижний	4,0	1,4	2,37	–	6,72	5
верхний	74,2	7,4	9,5	–	36,5	15
Стехиометрическое количество воздуха, $кг/кг$	2,7	0,4	15,2	0,4	–	0,34–0,37
Низшая теплотворная способность, $МДж/кг$	121	43	46	42–43	19,4	50
Коэффициент диффузии в воздухе $м^2/с$	$0,66 \cdot 10^{-4}$	–	–	–	–	$0,186 \cdot 10^{-4}$
Максимальная температура горения в воздухе, К	2503	2340	–	–	2175	2316
Энергия воспламенения, $кДж$	20	250	–	–	–	–
Скрытая теплота испарения, $кДж/кг$	451	209	390	188	1105	511

*Числитель – жидкое топливо, знаменатель – газообразное топливо.

Для повышения эффективности работы транспортных двигателей на газомоторном топливе необходимо обеспечить: образование равномерной смеси газомоторного топлива и равномерное распределение ее

по цилиндрам; получение необходимого воздушно-топливного соотношения; автоматическое регулирование необходимой величины топливopодачи при работе во всем диапазоне нагрузок; высокое качество пе-

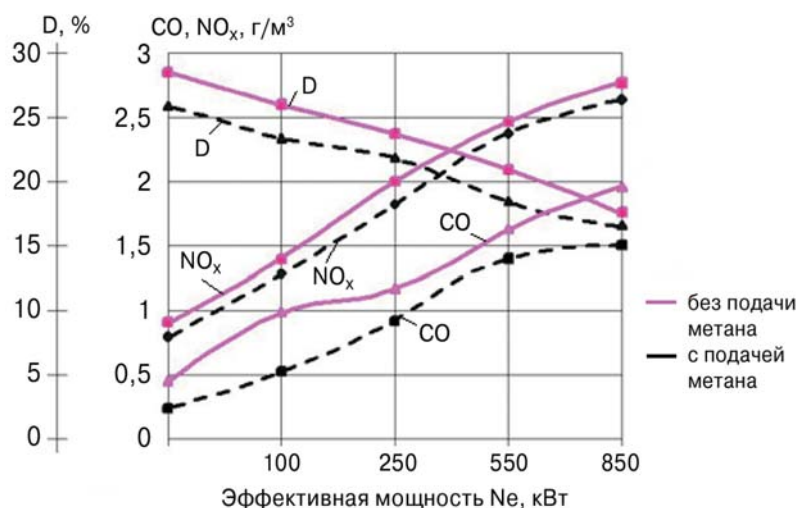


Рис. 3. Зависимость экологических характеристик дизеля K6S310DR тепловоза ЧМЭЗ, работающего на дизельном топливе без подачи и с подачей метана, от мощности

Fig. 3. The dependence of the environmental characteristics of diesel K6S310DR diesel locomotive CHME3, working on diesel fuel without flow of methane and with the supply of methane, on power

Таблица 2. Выбросы вредных веществ дизелем K6S310DR тепловоза ЧМЭЗ при его работе на альтернативном виде топлива

Table 2. Emissions of harmful substances by diesel engine K6S310DR of diesel locomotive CHME3 when operating on an alternative type of fuel

Выбросы	Вид топлива	Эффективная мощность N, кВт				
		0 (холостой ход)	100	250	550	850 (номинальный режим)
Оксид углерода CO, г/м³	ДТ	0,45	0,95	1,15	1,62	1,85
	ДТ + 30 % СНГ (C ₃ H ₈)	0,37	0,65	1,10	1,50	1,54
	ДТ + 10 % CH ₄	0,35	0,51	0,82	1,42	1,49
	ДТ + 4 % CH ₃ OH	0,40	0,42	0,92	1,55	1,63
	ДТ + 5 % H ₂	0,38	0,75	0,85	1,47	1,71
Оксиды азота NO _x , г/м³	ДТ	0,7	1,35	1,75	2,4	2,68
	ДТ + 30 % СНГ (C ₃ H ₈)	0,65	1,3	1,55	2,3	2,5
	ДТ + 10 % CH ₄	0,6	1,25	1,45	2,2	2,4
	ДТ + 4 % CH ₃ OH	0,95	1,15	1,6	2,3	2,75
	ДТ + 5 % H ₂	2,7	3,0	3,1	3,3	3,6
Дымность D, %	ДТ	28	26	23	21	17
	ДТ + 30 % СНГ (C ₃ H ₈)	25	22	21	19	18
	ДТ + 10 % CH ₄	21	23	22	18	15,5
	ДТ + 4 % CH ₃ OH	30	21	12	20	25
	ДТ + 5 % H ₂	20	12	9	6	3

Таблица 3. Выбросы загрязняющих веществ с отработавшими газами дизелей маневровых тепловозов

Table 3. Emissions of pollutants from exhaust gases of diesel engines of shunting diesel locomotives

Вид топлива	Показатель E в условных г/кг сгоревшего топлива				
	CO	CH	NO _x	Сажа	SO ₂
Природный газ	46,4	5,18	53,4	1,75	0,216
Газодизельная смесь	52,8	4,32	79,2	2,25	2,24
Дизельное топливо	61,3	4,02	98,1	2,86	6,44

реходных процессов; малые гидравлические сопротивления газозвдушного тракта; взрывобезопасность; легкий и надежный пуск; ремонтпригодность; простоту конструкции и надежность эксплуатации.

Реализацию перечисленных задач предлагается осуществить с помощью системы подачи газомоторного топлива с внутренним смесеобразованием (рис. 2).

Разработанная система подачи газомоторного топлива с

внутренним смесеобразованием была апробирована в научно-исследовательской лаборатории "Локомотивные энергетические установки" СамГУПС, а также в условиях станции реостатных испытаний и пункта экологического контроля сервисных локомотивных депо Южно-Уральской железной дороги — филиала ОАО "РЖД" [10].

Полученные результаты позволяют оценить влияние природного газа в качестве добавки к дизельному топливу на работу маневрового тепловоза во всем диапазоне мощностных характеристик с точки зрения экологической безопасности.

На рис. 3 представлены экологические характеристики дизеля K6S310DR тепловоза ЧМЭЗ при замещении дизельного топлива метаном в зависимости от эффективной мощности.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 3, показывает, что при 10 %-ном замещении дизельного топлива метаном уровни выбросов вредных веществ снижаются в среднем: CO на 6–8 %; NO_x на 4–8 %; D на 10–15 %.

Анализируя эффективность рассмотренных выше путей повышения экологической безопасности дизелей, а также неоднородность полученных результатов по различным токсичным веществам, выделяемым при работе, целесообразно рассматривать совокупный показатель вредности выхлопных газов E (усл. г/кг сгоревшего топлива).

Известно, что в эксплуатационных условиях для дизелей наибольшие валовые выбросы в атмосферу приходится именно на сажу, оксиды азота, углерода и углеводороды, при этом данные вещества имеют следующие коэффициенты агрессивности, нормированные по CO (A_{CO} = 1): A_{SO₂} = 22, A_{NO_x} = 41,1 и A_{CH} = 3,16. Совокупный показатель вредности выхлопных газов E определяет влияние всего спектра вредных веществ на экологические показатели двигателя [11].

Показатель в условных г/кг сгоревшего топлива определяется по формуле

$$E = \sum A_i e_i,$$

где A_i — относительная агрессивность вещества; e_i — удельный выброс химических компонентов

(г/кг топлива) в выхлопных газах двигателя.

Расчет совокупного показателя вредности выхлопных газов представлен в табл. 3.

Как следует из результатов проведенных исследований, а также расчетов совокупного по-

казателя вредности выхлопных газов дизелей тепловозов, наиболее перспективным с точки зрения экологической безопасности является метаносодержащий природный газ, так как он улучшает практически все экологические показатели дизелей за ис-

ключением выбросов углеводородов (СН). Кроме того, природный газ можно применять как добавку к дизельному топливу, тем более что при его содержании в топливе до 30 % не требуется изменять конструкцию двигателя.

Литература

1. Государственная программа Российской Федерации "Охрана окружающей среды" на 2012–2020 годы [Электронный ресурс]. URL: government.ru/programs/205/events (дата обращения 20.12.2018).

2. Носырев Д.Я., Скачкова Е.А., Росляков А.Д. Выбросы вредных веществ локомотивными энергетическими установками. Монография. Маршрут, 2006. 248 с.

3. Носырев Д.Я., Муратов А.В., Петухов С.А. Перспективы и проблемы применения водорода в локомотивных энергетических установках. Монография. Самара, СамГУПС, 2014. 112 с.

4. Петухов С.А., Муратов А.В., Курманова Л.С. Мероприятия по повышению экологической безопасности тепловозов. Проблемы безопасности на транспорте. Матер. VIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году науки. В 2 ч. Ч. 1. М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. Под общ. ред. Ю.И. Кулаженко. Гомель, БелГУТ, 2017. С. 243–245.

5. Скачкова Е.А. Пути снижения выбросов вредных веществ тепловозными дизелями. Монография. Самара. СамГАПС, 2007. 110 с.

6. Кавтарадзе Р.З. Теплофизические процессы в дизелях, конвертированных на природный газ и водород. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 238 с.

7. Марков В.А., Вальехо Мальдонадо П.Р., Бирюков В.В. Спиртовые топлива для дизельных двигателей. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 11. С. 39–52.

8. Программный комплекс Diesel-RK [Электронный ресурс]. URL: <http://www.diesel-rk.bmstu.ru> (дата обращения 21.12.2018).

9. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610605 Расчет энергетических параметров ДВС "ENGINE". Л.В. Булыгин, О.В. Яценко, И.Н. Жигулин, Е.Н. Ладоса. Приоритет от 11.03.2002. Опубликовано в Б.П. 2002. Бул. № 3.

10. Курманова Л.С. Повышение эффективности работы тепловозов путем применения газомоторного топлива. Известия Транссиба. 2017. № 3 (31). С. 22–31.

11. Булыгин Ю.И. Основы моделирования внутрицилиндровых процессов и токсичности дизелей тепловозов: Дис. ... д-ра техн. наук. 05.04.02 Ростов-на-Дону, 2006. 328 с.

References

1. Gosudarstvennaya programma Rossiiskoi Federatsii "Okhrana okruzhayushchei sredy" na 2012–2020 gody [Elektronnyi resurs]. URL: government.ru/programs/205/events (data obrashcheniya 20.12.2018).

2. Nosyrev D.Ya., Skachkova E.A., Roslyakov A.D. Vybrosov vrednykh veshchestv lokomotivnymi energeticheskimi ustanovkami. Monografiya. Marshrut, 2006. 248 s.

3. Nosyrev D.Ya., Muratov A.V., Petukhov S.A. Perspektivy i problemy primeneniya vodoroda v lokomotivnykh energeticheskikh ustanovkakh. Monografiya. Samara, SamGUPS, 2014. 112 s.

4. Petukhov S.A., Muratov A.V., Kurmanova L.S. Meropriyatiya po povysheniyu ekologicheskoi bezopasnosti teplovozov. Problemy bezopasnosti na transporte. Mater. VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. Godu nauki. V 2 ch. Ch. 1. M-vo transp. i kommunikatsii Resp. Belarus', Bel. zh. d., Belarus. gos. un-t transp. Pod obshch. red. Yu.I. Kulazhenko. Gomel', BelGUT, 2017. S. 243–245.

5. Skachkova E.A. Puti snizheniya vybrosov vrednykh veshchestv teplovoznymi dizelyami. Monografiya. Samara. SamGAPS, 2007. 110 s.

6. Kavtaradze R.Z. Teplofizicheskie protsessy v dizelyakh, konvertirovannykh na prirodnyi gaz i vodorod. M., Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2011. 238 s.

7. Markov V.A., Val'ekho Mal'donado P.R., Biryukov V.V. Spirtovye topliva dlya dizel'nykh dvigatelei. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie. 2015. № 11. S. 39–52.

8. Programmnyi kompleks Diesel-RK [Elektronnyi resurs]. URL: <http://www.diesel-rk.bmstu.ru> (data obrashcheniya 21.12.2018).

9. Svidetel'stvo ob ofitsial'noi registratsii programmy dlya EVM № 2002610605 Raschet energo-ekologicheskikh parametrov DVS "ENGINE". L.V. Bulygin, O.V. Yatsenko, I.N. Zhigulin, E.N. Ladasha. Prioritet ot 11.03.2002. Opublikovano v B.P. 2002. Byul. № 3.

10. Kurmanova L.S. Povyshenie effektivnosti raboty teplovozov putem primeneniya gazomotornogo topliva. Izvestiya Transsiba. 2017. № 3 (31). S. 22–31.

11. Bulygin Yu.I. Osnovy modelirovaniya vnutritsilindrovnykh protsessov i toksichnosti dizelei teplovozov: Dis. ... d-ra tekhn. nauk. 05.04.02 Rostov-na-Donu, 2006. 328 s.

Д.Я. Носырев – д-р техн. наук, профессор, Самарский государственный университет путей сообщения, 443066, г. Самара, 1-й Безымянный пер. 18, e-mail: vzletsamgups@mail.ru • Л.С. Курманова – аспирант, e-mail: leyla_kurmanova@mail.ru • А.С. Петухов – канд. техн. наук, доцент, e-mail: sakmara-cite@mail.ru • А.В. Муратов – канд. техн. наук, доцент • М.П. Ерзамаев – канд. техн. наук, доцент, Самарская государственная сельскохозяйственная академия, 446442 Россия, Самарская область, г. Кинель, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Учебная 2

D.Ya. Nosyrev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Samara State University of Routes of Communications, 443066 Russia, Samara, 1-st Bezmyanny Lane18, e-mail: vzletsamgups@mail.ru • L.S. Kurmanova – Post-graduate Student, e-mail: leyla_kurmanova@mail.ru • S.A. Petukhov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, e-mail: sakmara-cite@mail.ru • A.V. Muratov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor • M.P. Erzamaev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Samara State Agricultural Academy, 446442 Russia, Samara region, Kinel, Urban-type Settlement Ust-Kinelsky, Uchebnays Str. 2