

УДК 665.753:662.767.2

## РЕЗУЛЬТАТЫ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ДИЗЕЛЯ 4ЧН 11,0/12,5 НА СМЕСЯХ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА С БИОГАЗОМ

А.Н. Карташевич,

зав. каф. тракторов, автомобилей и машин для природообустройства БГСХА, докт. техн. наук, профессор

В.А. Шапорев,

аспирант каф. тракторов, автомобилей и машин для природообустройства БГСХА

В статье приведены результаты стендовых испытаний работы автотракторного дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) на чистом дизельном топливе (ДТ) и на смесях 85 % ДТ + 15 % биогаза (БГ) и 70 % ДТ + 30 % БГ. Исследовались эффективные показатели работы дизеля и показатели его дымности и токсичности при работе на этих смесях по внешней скоростной характеристике, снятой при рациональном значении угла опережения впрыскивания топлива  $\Theta_{оп.впр}=22^\circ$  до верхней мертвой точки (в.м.т.) и номинальной нагрузке. Проведенный комплекс экспериментальных исследований подтвердил возможность использования биогаза в качестве альтернативного топлива для дизельных двигателей. Применение газомоторного топлива на основе биогаза может частично или полностью заменить традиционные нефтяные топлива, сэкономить нефтяные ресурсы и сократить импорт нефтепродуктов, а также возможно их использование в существующих двигателях внутреннего сгорания без существенного изменения их конструкции.

**Ключевые слова:** биогаз, дизель, дизельное топливо, характеристика, отработавшие газы, дымность, токсичность.

*The results of development testing of the 4chn 11.0/12.5 (D-245.5S2) tractor diesel engine using pure diesel fuel (DF) and mixtures of 85% diesel fuel + 15% biogas (BG) and 70% DF + 30% BG are given in the article. Performance measures of the diesel engine and its exhaust smoke and toxicity indicators were studied. They were working on these mixtures based on the external speed characteristic taken at the rational value of the fuel injection advance  $\Theta_{VPR}=22^\circ$  to the upper dead point (V. M. T.) and the rated load. The conducted set of experimental studies confirmed the possibility of using biogas as an alternative fuel for diesel engines. The use of gas fuel based on biogas can partially or completely replace traditional oil fuels, save oil resources and reduce the import of oil products, as well as it can be used in existing internal combustion engines without significantly changing their design.*

**Keywords:** biogas, diesel, diesel fuel, characteristics, exhaust gases, exhaust smoking, toxicity.

### Введение

Истощение запасов нефти и традиционных энергоресурсов, рост цен на них и обострение экологических проблем обусловили глобальный интерес к разработке и использованию биогазовой технологии для получения механической, тепловой, электрической энергий и биоудобрений. Биогазовая технология может быть использована для переработки многих видов органических отходов, навоза, сточных вод и отходов сельскохозяйственных культур, улучшая экологическую обстановку местности.

Одним из перспективных видов альтернативного моторного топлива является биогаз, индустрия которого появилась за короткий промежуток времени во многих странах мира. Если в 80-х годах прошлого века в мире насчитывалось около 8 млн установок для получения биогаза суммарной мощностью в 1,7 – 2 млрд м<sup>3</sup> в год, то в настоящее время данные показа-

тели соответствуют производительности только одной страны – Китая [1-3].

В процессе переработки органических отходов в биогазовых установках получают два основных продукта – биоудобрение и БГ, которые можно использовать в сельскохозяйственном производстве и в быту [4, 5].

Биогаз – это смесь из 50...80 % метана (CH<sub>4</sub>), 20...50 % углекислого газа (CO<sub>2</sub>), до 1 % сероводорода (H<sub>2</sub>S) и незначительных следов азота (N<sub>2</sub>), кислорода (O<sub>2</sub>) и водорода (H<sub>2</sub>), а также продуктов метанового брожения органических веществ растительного и животного происхождения, осуществляемого специфическим природным биоценозом анаэробных бактерий различных физиологических групп. Энергия, заключенная в 1 м<sup>3</sup> БГ (20...25 МДж), эквивалентна энергии 0,6 м<sup>3</sup> природного газа, 0,74 литра нефти или 0,66 литра дизельного топлива. Соотношение CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> зависит от вида исходного субстрата и характеристик процесса брожения (температуры, времени пребывания

### Основная часть

массы в реакторе и загрузки его рабочего пространства). Теплотворная способность БГ составляет 22...19 МДж/м<sup>3</sup> и 1 м<sup>3</sup> его эквивалентен 0,7...0,8 кг условного топлива. В результате брожения из 1 тонны органического вещества (по сухой массе) получается 350...600 м<sup>3</sup> БГ, при этом КПД превращения энергии органических веществ в БГ составляет 80...90 % [6, 7].

Республика Беларусь относительно бедна собственными топливными ресурсами, поэтому экономически целесообразно наращивать потребление местных видов топлива и использовать нетрадиционные источники энергии.

Хотелось бы отметить, что Беларусь обладает существенным потенциалом для выработки биогаза, ведь активное развитие животноводческого комплекса страны обуславливает необходимость утилизации большого количества животноводческих отходов [8]. Действующие биогазовые комплексы Беларуси представлены в таблице 1.

**Таблица 1. Действующие биогазовые комплексы Беларуси**

Предприятие	Год ввода БГК в действие	Мощность, МВт
РУСП «СГЦ «Западный», Брестский р-н	2008	0,54
РУП «Племптицецезавод «Белорусский», Минский р-н	2008	0,34
ОАО «Гомельская птицефабрика»	2009	0,34
ОАО «Бобруйский завод биотехнологий»	2010	2,1
СПК «Агрокомбинат «Снов», Несвижский р-н	2011	2
ПТБО «Тростенецкий», г. Минск	2011	2
«БрестгорЖКХ», г. Брест	2011	3,15
СПК «Лань-Несвиж», Несвижский р-н	2012	1,4
СПК «Рассвет» им. К. П. Орловского, Кировский р-н	2012	4,8
ПТБО КУП «Оршакомхоз», г. Орша	2012	0,635
Агрофирма «Лебедево» Молодечненский р-н	2013	0,5
Э/б «Зазерье» НАН Беларуси, Пуховичский р-н	2015	0,35
Итого		18,155

Как видно из таблицы 1, биогаз имеет широкое распространение в рамках нашей страны, также его можно рассматривать в качестве альтернативного возобновляемого компонента для моторных топлив.

Целью работы является оценка влияния замещения ДТ биогазом на эффективные и экологические показатели работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2).

При проведении исследований ДТ замещалось БГ в процентном отношении по величине суммарной, вводимой в цилиндры дизеля теплоты (нижней теплотворной способности топлив). Содержание БГ в объеме 15 % и 30 % было выбрано из условия наличия необходимого воздуха для обеспечения полноты процесса сгорания, а также без регулирования штатной системы подачи ДТ.

С целью выявления влияния смесевых видов топлива, состоящих из 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ, на показатели работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S5), в научно-исследовательской лаборатории испытания двигателей внутреннего сгорания, на кафедре тракторов, автомобилей и машин для природообустройства БГСХА были проведены экспериментальные исследования.

В качестве тормозного устройства использовался электротормозной нагрузочный стенд SAK-N670, позволяющий регулировать скоростной и нагрузочный режим. Массовый расход ДТ определялся электронным расходомером АИР-50 с весовым устройством и комплектом измерительных приборов с выводом данных на монитор компьютера. Подача БГ осуществлялась системой питания, конструкция которой защищена патентом Республики Беларусь № 12202 [9]), объемный расход БГ определялся газовым счетчиком СМГ-4, а также блоком управляемых форсунок данной системы. Анализ проб отработавших газов (ОГ) производился с помощью автоматического газоанализатора Маха MGT-5. Дымность ОГ измерялась с помощью дымомера СИДА-107 «АТЛАС». Все приборы прошли государственную поверку. Общий вид экспериментальной установки и пульта управления представлены на рисунке 1.

Графическое изображение влияния БГ в смесевых составах с ДТ на изменение эффективных показателей дизеля представлено на рисунке 2.

Из графика видно, что работа дизеля на смесях ДТ и БГ вызывает некоторое изменение его эффективных показателей. Так, кривые значений эффективного КПД снижаются в сравнении с аналогичной кривой для ДТ во всем диапазоне изменения частоты вращения коленчатого вала. Величина КПД при  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$  составляет  $\eta_e=37,2 \%$  для ДТ, а для случая смеси 85 % ДТ + 15 % БГ –  $\eta_e=35 \%$ , и, наконец,  $\eta_e=34,1 \%$  для смеси 70 % ДТ + 30 %. Следовательно, эффективный КПД дизеля понижается с ростом замещения чистого ДТ биогазом на 5,91 % и 8,1 %.

Незначительное снижение эффективной мощности и крутящего момента дизеля с добавлением БГ происходит по всему диапазону изменения частоты вращения коленчатого вала. При  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$  мощность дизеля, работающего на ДТ, составляет  $N_e = 68 \text{ кВт}$ , а на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ ее значение составляет  $N_e = 67 \text{ кВт}$  и  $N_e = 65 \text{ кВт}$ , соответственно. Характерно, что мощность незначительно уменьшается с замещением ДТ в процентном отношении на смесях 15 % БГ и 30 % БГ на 1,47 % и 4,41 %. Крутящий момент при  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$  дизеля, работающего



Рисунок 1. Общий вид экспериментальной установки (а) и пульта управления (б) для проведения стендовых испытаний

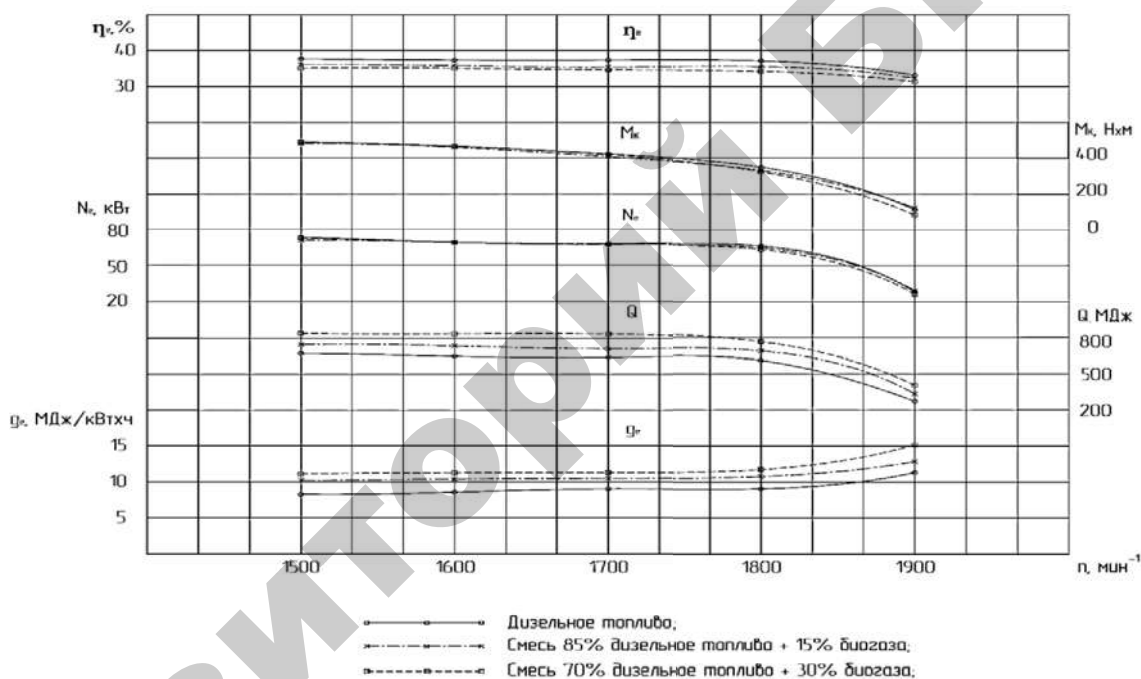


Рисунок 2. Скоростная характеристика дизеля 4Н 11,0/12,5 при рациональном значении угла опережения впрыскивания топлива  $\Theta_{оп.впр}=22^\circ$  до в.м.т.

на ДТ, составляет  $M_k=363 \text{ Н}\times\text{м}$ , а на смесях 15 % БГ и 30 % БГ его значение составляет  $M_k=354 \text{ Н}\times\text{м}$  и  $M_k=344 \text{ Н}\times\text{м}$ . Крутящий момент уменьшается с замещением ДТ на смесях 15 % БГ и 30 % БГ на 2,47 % и 5,23 %.

Снижение мощности крутящего момента и эффективного КПД дизеля на смесях ДТ и БГ означает, что снизилась эффективность процесса сгорания (его скорость и полнота). Общее количество теплоты, вводимой в цилиндры дизеля, поддерживалось на одинаковом уровне, но вблизи ВМТ теплоты выделяется меньше, дальше от ВМТ – больше. Количество теплоты, выделяющейся вблизи ВМТ, как раз и определяет эффективность рабочего цикла.

Характер изменения потребного значения вводимой теплоты  $Q$  в цилиндры дизеля сопровождается ее ростом по всему диапазону изменения частоты вращения. Значения теплоты  $Q$  при  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$  для ДТ и смесей 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ составляют  $Q=616,25 \text{ МДж}$ ,  $Q=695,94 \text{ МДж}$  и  $Q=738,08 \text{ МДж}$ , соответственно. Теплоты  $Q$ , вводимой в цилиндры дизеля при работе на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ, необходимо больше, чем для работы на чистом ДТ на 12,93 % и 19,77 %.

Кроме того, из графика видно (рис. 2), что при работе дизеля на чистом ДТ значение удельного эффективного расхода теплоты  $q_k$  значительно меньше, чем на топливах с добавлением 15 % БГ и 30 % БГ. Так, при

$n=1800 \text{ мин}^{-1}$  и работе на ДТ удельный эффективный расход теплоты составляет  $g_e=9,00 \text{ МДж/кВт}\cdot\text{ч}$ . Для смесей с добавлением 15 % БГ и 30 % БГ его значения равны  $g_e=10,44 \text{ МДж/кВт}\cdot\text{ч}$  и  $g_e=10,61 \text{ МДж/кВт}\cdot\text{ч}$ . В отношении к ДТ этот рост равен 16 % и 17,88 %, соответственно, для смесей с добавлением 15 % БГ и 30 % БГ. Данное увеличение удельного эффективного расхода теплоты и общего потребного количества теплоты, вводимой в цилиндры дизеля, объясняется меньшим значением низшей расчетной теплоты сгорания БГ и замедлением скорости его сгорания по отношению к ДТ.

Влияния применения смесей, состоящих из 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ на экологические показатели работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 по внешней скоростной характеристике представлены на рисунке 3.

В результате проведенных исследований было выявлено, что добавление 15 % БГ и 30 % БГ в ДТ приводит к уменьшению количества оксидов азота  $\text{NO}_x$  и диоксида углерода  $\text{CO}_2$  в ОГ дизеля 4ЧН 11,0/12,5. При номинальной частоте вращения коленчатого вала двигателя  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$  и работе на чистом ДТ содержание оксидов азота  $\text{NO}_x$  составляет 909 ppm, а для смесей 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ эти значения равны 889 ppm и 876 ppm. То есть, содержание оксидов азота  $\text{NO}_x$  в ОГ дизеля при его работе на смесях 15 % БГ и 30 % БГ меньше, чем при работе на ДТ на 2,2 % и 3,63 %. А выбросы диоксида углерода  $\text{CO}_2$  с ОГ незначительно уменьшаются с ростом замещения чистого ДТ биогазом, что в процентном соотношении составляет 1,2 % и 11 % для смеси 15 % БГ и 30 % БГ с ДТ. Снижение оксидов азота  $\text{NO}_x$  можно объяснить тем, что их эмиссия находится в прямой зависимости от содержания свободного кислорода в пламени при условии достаточ-

но высокой его температуры [10]. Снижение локальной и средней температуры цикла в случае работы дизеля на смесях с БГ непосредственно обуславливает снижение эмиссии оксидов азота.

С увеличением частоты вращения коленчатого вала содержание сажи в ОГ (рис. 3) снижается. Так, при  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$  уровень сажи в ОГ дизеля, работающего на чистом ДТ, составляет  $S=8,8 \%$ , а при работе дизеля на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ и той же частоте вращения коленчатого вала выбросы сажи составляют  $S=7,4 \%$  и  $S=6,3 \%$ . То есть, с увеличением БГ в смесевых составах при  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$  снижается содержание сажи на 15,9 % и 28,4 %.

Анализируя результаты замера выбросов оксида углерода  $\text{CO}$  и углеводородов  $\text{C}_n\text{H}_m$ , можно видеть, что данные показатели изменяются с увеличением количества БГ и с увеличением частоты вращения коленчатого вала. Так, на номинальном режиме  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$  при работе на смеси 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ выбросы  $\text{CO}$  в процентном отношении к ДТ увеличиваются на 33,3 % и 46,4 %. Выбросы углеводородов  $\text{C}_n\text{H}_m$  увеличиваются на 8,3 % и 66,4 %. Рост выбросов несгоревших углеводородов при работе дизеля с добавками БГ можно объяснить наличием в последнем многочисленных, плохо горящих компонентов, а рост выбросов оксида углерода  $\text{CO}$  можно объяснить снижением коэффициента избытка воздуха в топливовоздушной смеси и снижением наличия свободного кислорода [10].

### Заключение

1. Эффективные показатели работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 (Д-245.5S2) на смесях 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ в отличие от работы на чистом ДТ

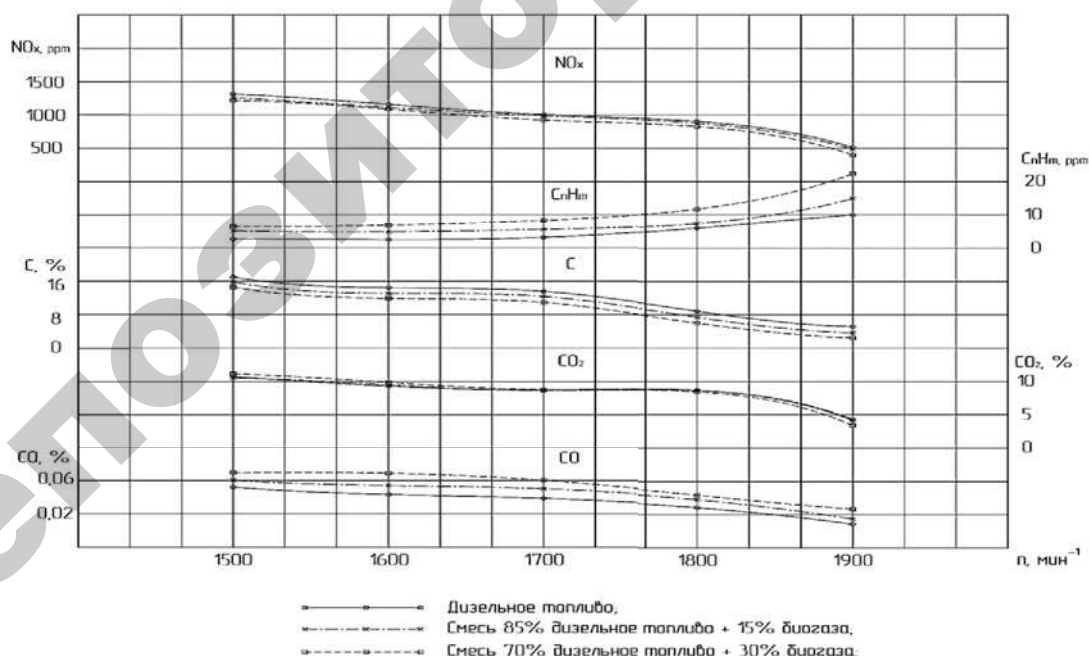


Рисунок 3. Показатели токсичности и дымности дизеля 4ЧН 11,0/12,5 в зависимости от частоты вращения коленчатого вала при рациональном значении угла опережения впрыскивания топлива  $\Theta_{оп.впр}=22^\circ$  до в.м.т.

имеют снижение мощности на 1,47 % и 4,41 %; снижение крутящего момента – на 2,47 % и 5,23 %; КПД – на 5,91 % и 8,1 %. Увеличение потребной теплоты, вводимой в цилиндры, на 12,93 % и 19,77 %; увеличение удельного эффективного расхода теплоты – на 16 % и 17,88 %.

2. Показатели токсичности и дымности дизеля 4ЧН 11,0/12,5 по внешней скоростной характеристике на смесевых топливах 85 % ДТ + 15 % БГ и 70 % ДТ + 30 % БГ относительно показателей работы дизеля на чистом ДТ на номинальном режиме  $n=1800$  мин<sup>-1</sup> сопровождаются снижением выбросов оксидов азота на 2,2 % и 3,63 %, диоксида углерода – на 1,2 % и 11 %, частиц сажи – на 15,9 % и 28,4 %, увеличением выбросов углеводородов на 8,3 % и 66,4 %, оксидов углерода – на 33,3 % и 46,4 %.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Альтернативные виды топлива для двигателей: монография / А.Н. Карташевич [и др.]. – Горки: БГСХА, 2013. – 376 с.

2. Кавтарадзе, Р.З. Теплофизические процессы в дизелях, конвертированных на природный газ и водород / Р.З. Кавтарадзе. – М: Московский гос. технич. ун-т им. Н.Э. Баумана. – 2011. – 238 с.

3. Плотников, С.А. Система питания генераторным газом ДВС и установка для его осуществления. Проблемы эксплуатации автомобильного транспорта и пути их решения на основе современных информационно-коммуникационных технологий: сб. науч. тр.

/ С.А. Плотников, А.С. Зубакин, А.Н. Коротков. – Воронеж, 2015. – С. 66-69.

4. Васильев, Ю.Н. Газовые и газодизельные двигатели / Ю.Н. Васильев, Л.С. Золотаревский, С.И. Ксенофонтов. – М: Газпром. – 1992. – 127 с.

5. Марков, В.А. Работа дизелей на нетрадиционных топливах: учеб. пос. / В.А. Марков, А.И. Гайворонский, Л.В. Грехов, Н.А. Ивашенко. – М.: Легион-Автодата, 2008. – 464 с.

6. Kartashevich, A.N. Flammability of New Diesel Fuels / A.N. Kartashevich, S.A. Plotnikov // Russian Engineering Research, 2018. – Vol. 38. – № 6. – P. 424-427.

7. Карташевич, А.Н. Возобновляемые источники энергии: науч.-практ. пос. / А.Н. Карташевич, В.С. Товстыка. – Горки: БГСХА, 2008. – 261 с.

8. Клочков, А.В. Биогаз: итоги и перспективы использования / А.В. Клочков, П.М. Новицкий // Наше сельское хозяйство. – Минск, 2017. – Вып. 74. – С. 34-35.

9. Система подачи газообразного топлива в дизель: пат. 12202 Респ. Беларусь, МПК F 02M 43/00 / А.Н. Карташевич, В.А. Шапорев, П.Ю. Малышкин, заяв. Белорус. гос. с-х. академия. – № u 20190044; заявл. 18.02.2019; опубл. 01.11.2019 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2019.

10. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени: пер. с англ. / Под ред. Ю.Ф. Дитякина. – М.: Машиностроение, 1981. – 408 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 17.12.2019

## Микропроцессорная система кормления свиней

*Предназначена* для оперативного изменения доз кормления, контроля процесса кормления, учета расхода сухого и жидкого корма.

Разработанная система позволяет автоматизировать процесс кормления свиней, повысить эффективность и снизить издержки производства свинины.

### Основные технические данные

1. Полная совместимость с типовым технологическим оборудованием КПС-54, КПС-108.
2. Нормированное кормление, оперативное изменение норм кормления.
3. Расчет фактических объемов замеса и раздачи жидкого корма без остатков.
4. Сокращение времени кормления в 1,5...2 раза.
5. Значительно дешевле и лучше западных аналогов.

