

3. Коблов, С.П. Пути снижения динамической нагруженности трактора с гусеничными движителями при обработке почвы [Текст] / С.П. Коблов, Г.И. Жидков // Эколого-мелиоративные аспекты рационального природопользования: материалы Международной научно-практической конференции (г. Волгоград, 31 янв. – 1 февр. 2017 г.) / Волгоградский ГАУ. – Волгоград, 2017. – С. 92-97.

4. Жидков, Г.И. Расчет упругих звеньев в системе передачи силового потока при случайном характере нагружения МТА [Текст] / Г.И. Жидков, Н.Г. Кузнецов, Б.А. Маслов // СХИ. Сб. науч. трудов. Вып. 74. – Волгоград, 1980. – С. 48.

5. Жидков, Г.И. Пути повышения эксплуатационных показателей пахотного агрегата с трактором Дт-175С при применении упругой связи в механизме навески [Текст] / Г.И. Жидков. // Средства повышения эксплуатационных качеств машинно-тракторных агрегатов: сб. науч. трудов / ВСХИ. – Волгоград, 1988. – С. 37-41.

6. Жутов, А.Г. Тягово-динамические показатели гусеничного трактора с ДПМ и с упругой связью в навесной системе [Текст] / А.Г. Жутов // ВСХИ. Сб. науч. трудов. Обеспечение работоспособности и эффективности использования с.-х. техники. / ВСХИ. – Волгоград, 1994. – С. 27-28.

7. Кузнецов, Н.Г. Экспериментальные исследования влияние горизонтальной жесткости механизма навески на показатели работы гусеничного трактора [Текст] / Н.Г. Кузнецов, Г.И. Жидков // Совершенствование конструкций и методов использования машин в сельском хозяйстве: сборник научных трудов / ВСХИ. – Волгоград. 1979. – С. 87-91.

8. Кузнецов, Н.Г. Стабилизация режимов работы скоростных машинно-тракторных агрегатов [Текст]: монография / Н.Г. Кузнецов, В.Г. Кривов, Ю.П. Дегтярев и Г.И. Жидков. – Волгоград, изд-во «ИПК Нива», 2006. – 423 с.

9. Ткачев, В.Н. Методы повышения долговечности деталей машин [Текст] / В.Н. Ткачев // М.: Машиностроение, 1971. – 272 с.

10. Жидков, Г.И. К вопросу определения коэффициента готовности трактора [Текст] / Г.И. Жидков, Г.А. Любимова // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2015. – № 3 (39). – С. 183-187.

УДК 621.436

## **РАСЧЁТ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГАЗОДИЗЕЛЯ НА НИЗКОКАЛОРИЙНЫХ ГАЗАХ**

**Сергеев А.П., к.т.н. доцент**

*ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет»,  
г. Волгоград, Россия,*

**Стремоухов А.Б., аспирант,  
Улексин В.А., к.т.н., доцент**

*«Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет»,  
г. Днепр, Украина*

**Аннотация.** Конвертирование дизельных двигателей на газодизельный процесс осуществляется практиками без соответствующих расчетов, что не позволяет предусмотреть последствия конвертирования на стадии разработки проекта. Предложены уточнения методики расчета рабочего процесса конвертируемого газодизеля при применении горючих газов с малым содержанием метана.

*Ключевые слова:* конвертированный дизель, газодизельный процесс, горючие газы, биогаз, моторное топливо, смесеобразование, топливо-воздушная смесь.

**Введение.** Существующие схемы систем питания конвертируемых газодизелей рассчитаны на использование в качестве газового топлива природного газа с содержанием метана 85...95 %. Ситуация на рынке моторного топлива побуждает к поиску альтернативных горючих газов, которыми могут быть биогаз (биометан) – горючий газ, полученный метановым сбраживанием органических отходов, или шахтный газ с низким содержанием метана. Учитывая существенные отличия свойств этих газов от природного [2] и особенности систем питания конвертируемого газодизеля, общепринятая методика расчета газодизельного рабочего процесса нуждается в уточнениях.

Несмотря на то, что в газодизельном процессе происходит горение двух видов топлива, которые отличаются по своим физико-химическими свойствами и способом смесеобразования, по известным методикам расчет рабочего процесса газодизеля ведется как для двигателя с внешним смесеобразованием. При расчете рекомендуется на основе априорных данных задаваться количеством жидкого топлива в кг на 1 моль сжигаемого газа и выбирать коэффициент избытка воздуха газозоудшной смеси [1]. В конвертируемом газодизеле регулирование мощности осуществляется путем изменения подачи газа при почти неизменной подаче запальной дозы жидкого топлива, что приводит к изменению соотношения газ-дизельное топливо. Поэтому применение существующей методики без уточнений нельзя считать удобным в использовании, а в некоторых случаях – и корректным.

Цель работы – уточнение методики расчета рабочего процесса конвертируемого газодизеля при использовании в качестве моторных топлив горючих газов с малым содержанием метана.

При практическом переводе базового дизеля [4, 5] в газодизельный режим ограничивают цикловую подачу жидкого топлива и вместо него подают природный газ (метан) в количествах, которые обеспечивают то же тепловыделение в камере сгорания. Это обеспечивает сохранение мощности и скоростных характеристик конвертируемого двигателя на уровне базового [6]. Запальную дозу  $D$  жидкого топлива устанавливают примерно 25 % ( $D = 0,25$ ) от номинальной подачи. При увеличении запальной дозы ухудшаются экономические показатели, при ее уменьшении возникает угроза перегрева распылителей форсунок и возникновения детонации на режимах полной нагрузки.

Из-за внешнего смесеобразования газозоудшной смеси в газодизеле уменьшается количество воздуха, поступающего в цилиндр двигателя (рис. 1), что приводит к уменьшению фактического коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , который может достичь недопустимого значения с выходом процесса за пределы дымления. Присутствие га-

воздушной смеси в топливном факеле, который развивается в камере сгорания, способствует улучшению процессов испарения и горения жидкого топлива, благодаря чему, как известно, уменьшается образование сажи и дымность отработавших газов.

При использовании штатной топливной аппаратуры уменьшение подачи жидкого топлива осуществляется изменением конца подачи. При этом уменьшается продолжительность периода быстрого горения и общая продолжительность горения [3], что приводит к росту жесткости рабочего процесса и изменению характеристики тепловыделения. Это обстоятельство требует установки меньшего угла опережения подачи топлива. В расчетах рабочего процесса изменение характера тепловыделения отображается как увеличение степени повышения давления  $\lambda$  в процессе горения в 1,3...1,5 раза и соответствующего уменьшения расчетной степени предварительного расширения  $\rho$  [1].

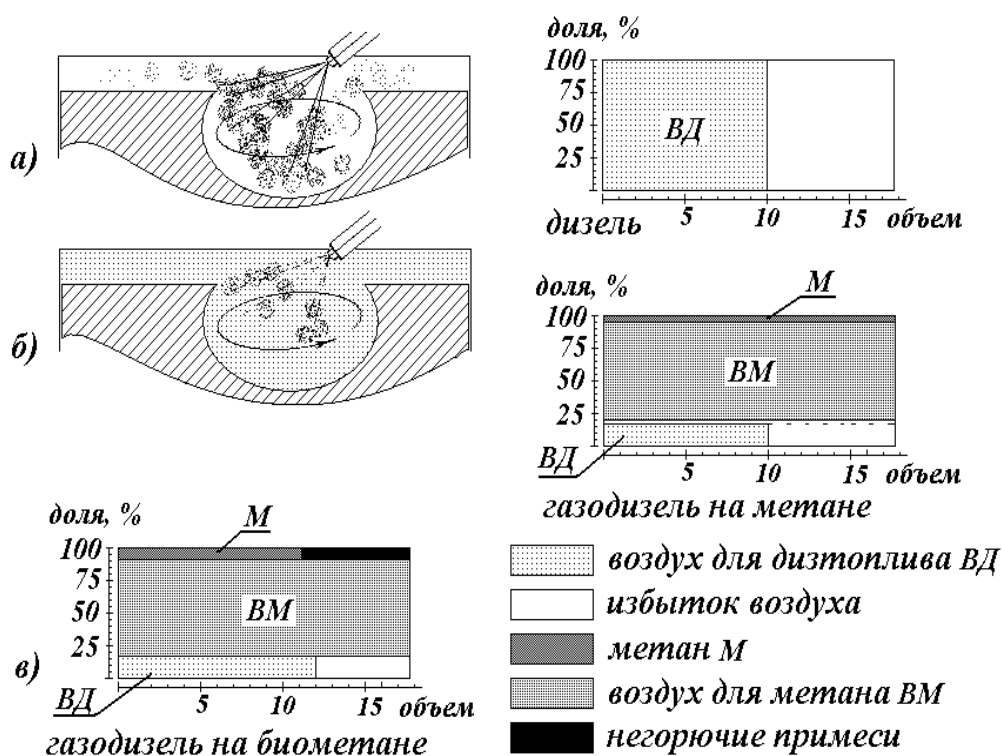


Рисунок 1 – Схема смесеобразования в дизеле (а) и в газодизеле (б) и соотношение компонентов смеси газов в камере сгорания

Расчет процесса горения дизеля начинают с определения параметров топливо-воздушной смеси [1]. Рассмотрим методику расчета на конкретном примере.

Теоретически необходимое количество воздуха  $L_o$  для сгорания одного килограмма жидкого топлива с составом С, Н, О составляет:

$$L_o = \frac{1}{0,21} \cdot \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right) = (0,857/12 + 0,133/4 + 0,01/32) / 0,21 = 0,49692 \text{ кмоль/кг},$$

где 0,21 – содержание кислорода в воздухе по объему;  $C = 0,857$ ,  $H = 0,133$ ,  $O = 0,01$  – принятый к расчету элементный состав топлива.

Фактически необходимое количество воздуха  $L_{од}$  для сгорания одного килограмма топлива:

$$L_{од} = \alpha \cdot L_o = 1,6 * 0,49692 = 0,79508 \text{ кмоль/кг} = 17,81 \text{ м}^3/\text{кг},$$

где  $\alpha = 1,6$  – принятый коэффициент избытка воздуха.

Проверим достаточность воздуха в цилиндре для осуществления полного сгорания топлива в режиме газодизеля при использовании чистого метана.

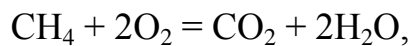
Учитывая, что расчет рабочего процесса дизеля осуществляется относительно одного килограмма дизельного топлива, находим, что при запальной дозе  $D = 0,25$  (25 % от номинальной подачи или  $M_{зд} = 0,25$  кг) для замещения 75% дизтоплива (что равняется  $M_d = 0,75$  кг) с теплотой сгорания  $Q_{н.} = 42,5$  МДж/кг необходимо подать соответствующее количество  $M_r$  метана с теплотой сгорания  $Q_{нг.} = 33,8$  МДж/м<sup>3</sup>:

$$M_r = M_d * Q_{н.} / Q_{нг.} = 0,75 * 42,5 / 33,8 = 0,943 \text{ м}^3.$$

Таким образом, в объеме газозоудушной смеси  $L_{од} = 17,81$  м<sup>3</sup>, что равняется объему воздуха  $W_d$  при впуске в дизель, должно содержаться  $M_r = 0,943$  м<sup>3</sup> метана. Объем воздуха  $W_{гд}$  в газозоудушной смеси составляет:

$$W_{гд} = W_d - M_r = 17,81 - 0,943 = 16,867 \text{ м}^3.$$

Сгорание метана происходит по реакции:



т.е., объем кислорода, необходимый для сгорания метана, в два раза больше объема метана, а объем воздуха, используемый на горение, 1 м<sup>3</sup> метана составляет:

$$L_{ог} = 2 * 1 / 0,21 = 9,52 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

где 0,21 – содержание кислорода в воздухе по объему.

Таким образом, для сгорания  $0,943 \text{ м}^3$  метана из топливо-воздушной смеси тратится:

$$W_{\text{пр}} = M_{\text{г}} * L_{\text{ог}} = 0,943 * 9,52 = 8,98 \text{ м}^3 \text{ воздуха.}$$

Для сгорания  $M_{\text{зд}} = 0,25 \text{ кг}$  запальной дозы дизтоплива в топливо-воздушной смеси остается объем  $W_{\text{гдз}}$  воздуха:

$$W_{\text{гдз}} = W_{\text{гд}} - W_{\text{пр}} = 16,867 - 8,98 = 7,887 \text{ м}^3,$$

что составляет

$$L_{\text{озд}} = W_{\text{гдз}} / M_{\text{зд}} = 7,887 / 0,25 = 31,548 \text{ м}^3 / \text{кг} = 1,408 \text{ кмоль} / \text{кг}.$$

Общая потребность воздуха на полное окисление дизтоплива и газа в газодизеле составляет:

$$L_{\text{огд}} = M_{\text{зд}} * L_{\text{о}} * 22,4 + W_{\text{пр}} = 0,25 * 0,49692 * 22,4 + 8,98 \text{ м}^3 = 11,76 \text{ м}^3,$$

где  $22,4$  – объем 1 кмолья воздуха,  $\text{м}^3$ .

Общий коэффициент избытка воздуха в газодизельном режиме при работе на чистом метане составит:

$$\alpha_{\text{гд}} = W_{\text{гд}} / L_{\text{огд}} = 16,867 / 11,76 = 1,43.$$

Такой коэффициент избытка воздуха обеспечивает полное сгорание и жидкого, и газообразного топлива, т.е., замещение 75 % дизельного топлива метаном не вызывает ухудшения показателей рабочего процесса.

Если в качестве горючего газа используется биометан, в котором содержание негорючих компонентов (азот, двуокись углерода и пр.) может превышать 60 % по объему, то их наличие приводит к уменьшению количества воздуха в камере сгорания и соответствующее уменьшение коэффициента избытка воздуха (рис. 1 в). Обозначим объемное содержание метана в горючем газе через  $\eta_{\text{м}}$  и примем для расчета  $\eta_{\text{м}} = 0,5$ . Тогда для рассмотренного примера определяем, что объем воздуха в газовой смеси будет составлять:

$$W_{\text{гд}} = W_{\text{д}} - M_{\text{г}} / \eta_{\text{м}} = 17,81 \text{ м}^3 - 0,943 / 0,5 = 15,924 \text{ м}^3,$$

а коэффициент избытка воздуха в газодизельном режиме равняется:

$$\alpha_{\text{гд}} = W_{\text{гд}} / L_{\text{огд}} = 15,924 / 11,76 = 1,354.$$

Расчет параметров топливо-воздушной смеси по описанной методике выполнен для разных значений запальной дозы жидкого топлива (от 10 до 90 %) при разной концентрации метана в биогазе (от 10 до 90 %). Как видно из результатов расчетов, представленных в таблице 1 и на рисунке 2, питать газодизель биогазом с содержанием метана меньше 15 % нецелесообразно, так как для обеспечения номинальной мощности приходится существенно увеличивать запальную дозу и расход дизельного топлива.

Таблица 1 – Результаты расчета состава топливно-воздушной смеси для разной величины замещения дизтоплива и при разной концентрации метана в биогазе

Параметр	Запальная доза, % и необходимый объем метана в камере сгорания, м <sup>3</sup>									
	10 % 1,132 м <sup>3</sup>	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Объем свободного воздуха V (м <sup>3</sup> ) и коэффициент избытка воздуха $\alpha$ при концентрации метана в газе 5 %										
V, м <sup>3</sup>	-16.71*	-14.111	-11.513	-8.914	-6.315	-3.716	-1.118	1.481	4.080	6.679
$\alpha$	-0.406**	-0.196	0.018	0.234	0.453	0.676	0.902	1.131	1.364	1.600
при концентрации метана в газе 10 %										
V, м <sup>3</sup>	-5.393	-4.052	-2.711	-1.369	-0.028	1.313	2.655	3.996	5.337	6.679
$\alpha$	0.546	0.657	0.769	0.882	0.998	1.115	1.233	1.354	1.476	1.600
при концентрации метана в газе 15 %										
V, м <sup>3</sup>	-1.621	-0.699	0.223	1.145	2.068	2.990	3.912	4.834	5.756	6.679
$\alpha$	0.864	0.941	1.019	1.098	1.179	1.261	1.344	1.428	1.513	1.600
при концентрации метана в газе 20 %										
V, м <sup>3</sup>	0.265	0.977	1.690	2.403	3.115	3.828	4.541	5.253	5.966	6.679
$\alpha$	1.022	1.083	1.144	1.207	1.270	1.334	1.399	1.465	1.532	1.600
при концентрации метана в газе 25 %										
V, м <sup>3</sup>	1.397	1.983	2.570	3.157	3.744	4.331	4.918	5.505	6.092	6.679
$\alpha$	1.117	1.168	1.219	1.271	1.324	1.378	1.432	1.487	1.543	1.600
при концентрации метана в газе 30 %										
V, м <sup>3</sup>	2.151	2.654	3.157	3.660	4.163	4.666	5.169	5.672	6.176	6.679
$\alpha$	1.181	1.225	1.269	1.315	1.360	1.407	1.454	1.502	1.551	1.600
при концентрации метана в газе 90 % и больше (природный газ)										
V, м <sup>3</sup>	4.666	4.889	5.113	5.337	5.560	5.784	6.008	6.231	6.455	6.679
$\alpha$	1.393	1.414	1.436	1.459	1.481	1.504	1.528	1.551	1.576	1.600

\* отрицательное значение указывает на нехватку воздуха и потерю мощности двигателя

\*\* отрицательное значение расчетной величины  $\alpha$  указывает на невозможность реализации данного режима

Известно, что дымность отработавших газов в газодизеле превышает допустимые значения после уменьшения коэффициента избытка воздуха ниже 1,2...1,1. На рисунке 2 зона этих режимов помечена затенением. Курсивом в таблице 1 выделены значения коэффициента избытка воздуха, которые не обеспечивают полного сгорания топлива, что вызывает увеличение дымности отработавших газов.

Биогаз с содержанием метана больше 20 % можно использовать в качестве полноценного моторного топлива для газодизеля при величине запальной дозы больше 25 % от номинальной подачи. Такие газодизели с успехом могут применяться в составе мотор-генераторов на биоустановках утилизации органических отходов крупных животноводческих комплексов вместо специализированных газовых двигателей с искровым зажиганием. Как известно, основным недостатком двигателей с искровым зажиганием является высокая чувствительность к составу топливо-воздушной смеси, который зависит от режима работы биореактора.

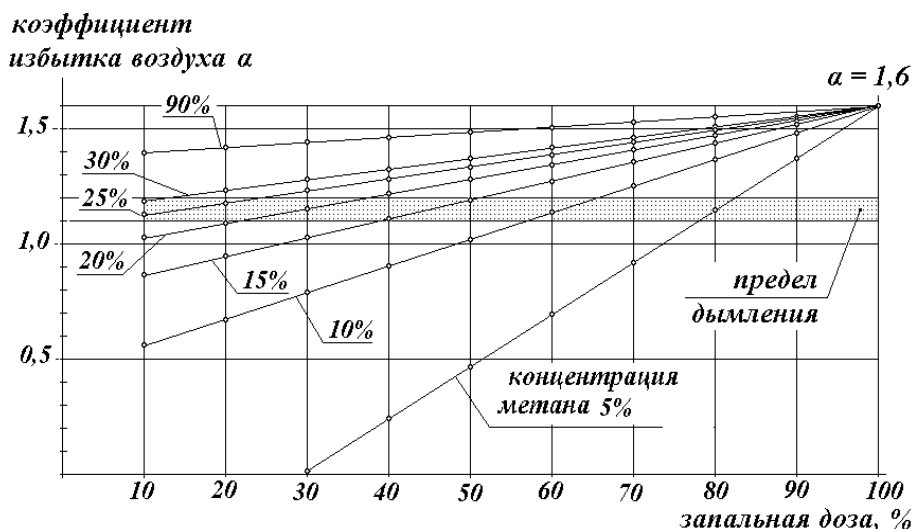


Рисунок 2 – Зависимость максимально возможного коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  от запальной дозы жидкого топлива при разной концентрации метана в биогазе

При использовании необогащенного шахтного газа методика расчета должна несколько измениться, так как метан находится в смеси с газами, состав которых близкий к составу воздуха. При этом следует определиться с минимальной концентрацией метана, при которой достигается достаточное замещение дизельного топлива. Так, для рассмотренного примера при объемном содержании метана в шахтном газе  $\eta_m = 0,05$  (5 %) и подаче в двигатель лишь шахтного газа без примесей свежего воздуха, в топливо-воздушной смеси может находиться не больше  $17,81 \text{ м}^3/\text{кг} * 0,05 = 0,89 \text{ м}^3$  метана вместо необходимых  $M_T = 0,943 \text{ м}^3$ , что не обеспечивает достаточного тепловыделения и сохранения мощности.

Таблица 2 – Результаты расчета состава топливо-воздушной смеси для разной величины замещения дизтоплива и при разной концентрации метана в шахтном газе

Параметр	Запальная доза D в % и необходимый объем метана в камере сгорания, м <sup>3</sup>									
	10, % 1,132,м <sup>3</sup>	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
		1,006	0,880	0,754	0,629	0,503	0,377	0,251	0,126	-
Доля метана от необходимого количества (%) и коэффициент избытка воздуха $\alpha$										
при концентрации метана в шахтном газе 1 %										
D, %	15.7	17.7	20.2	23.6	28.3	35.4	47.2	70.8	141.6	-
$\alpha$	6.278	4.496	3.502	2.868	2.428	2.105	1.858	1.663	1.577	1.600
при концентрации метана в шахтном газе 2 %										
D, %	31.5	35.4	40.5	47.2	56.7	70.8	94.4	141.6	283.3	
$\alpha$	3.875	3.107	2.593	2.225	1.949	1.733	1.561	1.554	1.577	1.600
при концентрации метана в шахтном газе 3 %										
D, %	47.2	53.1	60.7	70.8	85.0	106.2	141.6	212.5	424.9	
$\alpha$	2.787	2.362	2.050	1.811	1.622	1.509	1.531	1.554	1.577	1.600
при концентрации метана в шахтном газе 4 %										
D, %	63.0	70.8	80.9	94.4	113.3	141.6	188.9	283.3	566.6	
$\alpha$	2.166	1.898	1.689	1.522	1.487	1.509	1.531	1.554	1.577	1.600
при концентрации метана в шахтном газе 5 %										
D, %	78.7	88.5	101.2	118.0	141.6	177.0	236.1	354.1	708.2	
$\alpha$	1.764	1.581	1.445	1.466	1.487	1.509	1.531	1.554	1.577	1.600
при концентрации метана в шахтном газе 6 %										
D, %	94.4	106.2	121.4	141.6	170.0	212.5	283.3	424.9	849.8	
$\alpha$	1.483	1.424	1.445	1.466	1.487	1.509	1.531	1.554	1.577	1.600
при концентрации метана в шахтном газе 7 %										
D, %	110.2	123.9	141.6	165.2	198.3	247.9	330.5	495.7	991.5	
$\alpha$	1.403	1.424	1.445	1.466	1.487	1.509	1.531	1.554	1.577	1.600



Задаваясь концентрацией метана в шахтном газе, проведем расчет состава топливно-воздушной смеси и проверим возможность работы газодизеля с полной нагрузкой. Результаты расчетов сведены в таблицу 2 и представлены в виде графиков на рисунке 3. В таблице 2 курсивом отмеченные режимы с недостаточной подачей метана, при которых двигатель не сможет развивать номинальную мощность и нуждается в увеличении запальной дозы жидкого топлива выше экономически целесообразного значения.

Анализ расчетов показывает, что при концентрациях метана в шахтном газе 6 % полная мощность может быть развита газодизелем лишь при величине запальной дозы жидкого топлива больше 20 % от номинальной подачи. Шахтный газ с концентрацией метана меньше 5 % целесообразно использовать лишь для работы газодизеля на частичных нагрузках. При концентрации метана больше 7 % шахтный газ можно считать полноценным моторным топливом для газодизеля. При этом следует помнить, что такие газодизели могут использоваться лишь как стационарные (например, дизель-генераторы). Хранение шахтного газа с низким содержанием метана в баллонах нецелесообразно по причинам неудовлетворительной энергоплотности газобаллонной установки и опасности взрыва баллонов при сжатии газовой смеси.

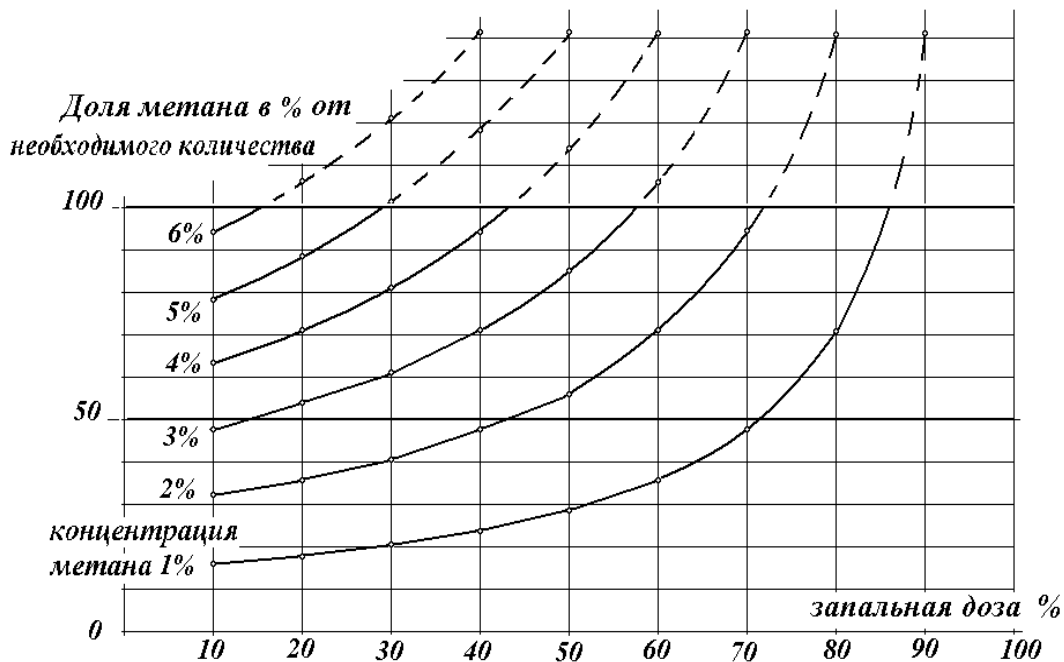


Рисунок 3 – Зависимость максимально возможного замещения дизтоплива при работе газодизеля на шахтном газе с разной концентрацией метана

## Выводы

1. Сущность предложенных уточнений расчета рабочего процесса конвертируемого газодизеля сводится к использованию расчетных данных по базовому дизелю с последующей проверкой работоспособности при замещении некоторого количества жидкого топлива газообразным, с известным компонентным составом, в количестве, обеспечивающем тепловой эквивалент.

2. Замещение дизельного топлива газом, который подается во впускной трубопровод, приводит к уменьшению количества воздуха в цилиндре дизеля.

3. Исследования показали, что наличие запаса воздуха в камере сгорания базового дизеля позволяет применять биогаз с содержанием метана больше 20 % без уменьшения мощности конвертируемого газодизеля.

4. Применение шахтного газа с содержанием метана меньше 5 % в качестве моторного топлива для питания газодизеля позволяет работать лишь на режимах частичных нагрузок.

5. Шахтный газ с содержанием метана больше 7 % может считаться полноценным моторным топливом для стационарных газодизелей в составе мотор-генераторов.

### Список использованной литературы:

1. Дизели [Текст]: справочник / под общ. ред. В.А. Ванштейдта, Н.Н. Иванченко, Л.К. Коллерова. – Л.: Машиностроение, 1977. – 479 с.
2. Тимченко, И.И. Эффективное использование биотоплив как моторных [Текст] / И.И. Тимченко, П.В. Жадан, А.А. Ефремов // Двигатели внутреннего сгорания: Всеукраинский научно-технический журнал. - 2006.- №2. - С. 159-163.
3. Улексин, В.А. Особенности рабочего процесса конвертируемого газодизеля [Текст] / В.А. Улексин, Е.В. Луценко // Вестник Кременчукского государственного политехнического университета. – 2004.- №4 (27).- С. 121-122.
4. Никитин, А.Я. Разработка рекомендаций по дальнейшему повышению технико-эксплуатационных качеств трактора ДТ-175С [Текст] / А.Я. Никитин, А.П. Сергеев, В.П. Шевчук и др.; Волгоградский сельскохозяйственный ин-т.- Волгоград, 1977.- 176с. – Деп. № 641523511.
5. Кузнецов, Н.Г. Исследование надежности тракторов ДТ-175С и ДТ-75Н, эксплуатирующихся в хозяйствах Волгоградской области [Текст] / Н.Г. Кузнецов, А.Г. Жутов, А.П. Сергеев; Волгоградский тракторный завод. - 1988. - 165с. – Деп. 15.09.1988.
6. Улексин, В.А. Тепловые двигатели. [Текст]: учеб. пособие для студ. фак. механизации сельского хозяйства по дисциплине "Тракторы и автомобили" / В.А. Улексин, А.П. Сергеев. - Волгоград: Изд. ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, 2012. - 256 с.