

# НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ПАВЛОДАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им.С.ТОРАЙГЫРОВА



4'2003



**ПМУ хабаршысы**  
**Вестник ПГУ**

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ДИЗЕЛЕЙ С РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ

*А.К. Каракаев, Б.М. Кривенко*

*Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова*

*Моторда пайдалынган газдарды дизелге қайта еңгізу жете зерттелген жүйесі және салыс- тырма сынақтан өткізу әдістемесі келтірілген. Ғылыми жұмыскерлерле, өндірісшілерле, әсіресе аспиранттарға, магистранттарға және студенттерге пайдасы тиеді.*

*Приводятся разработанная система рециркуляции отработавших газов дизеля и методика сравнительных исследований. Полезна научным работникам, производственникам, особенно аспирантам, магистрантам и студентам.*

*Happen to developed system an uncirculation of perfected gases of diesel and strategy of comparative studies. The useful for scientific workmans, production workers, particularly graduate students, higher education students (magisters) and students.*

Испытания двигателя с рециркуляцией отработавших газов (РОГ) были проведены в широком диапазоне возможных в эксплуатации режимов, включая и режимы пуска и послепускового прогрева, с целью выяснения влияния РОГ на основные показатели рабочего процесса дизеля (РПД) и установления оптимального закона регулирования РОГ, результаты которых были переданы Алтайскому моторному заводу (АМЗ) [1-3] и докладывались на республиканских и всесоюзных научно-технических конференциях [4-8].

Разработано устройство для РОГ (рис.), состоящее из короткой перепускной трубы 2, по которой ОГ поступают из выхлопной трубы к узлу регулирования. Последний установлен между воздухоочистителем 10 и соединительным патрубком 5 впускного коллектора. РОГ регулируется клапаном 1, седло 3 которого фланцем крепится к корпусу 4. Для улучшения регулировочной характеристики клапана и хорошего перемешивания газов с воздухом в седле за фаской выполнен конус «К» и рефлектор. Стержень клапана перемещается в направляющей 7 и скобе 8 гайками 9. Перемещение клапана фиксируется указателем (на схеме не показан). Ртутным термометром с пределами измерений 0-150°C и ценой деления в 1°C измеряется  $t_{ГВС}$ .

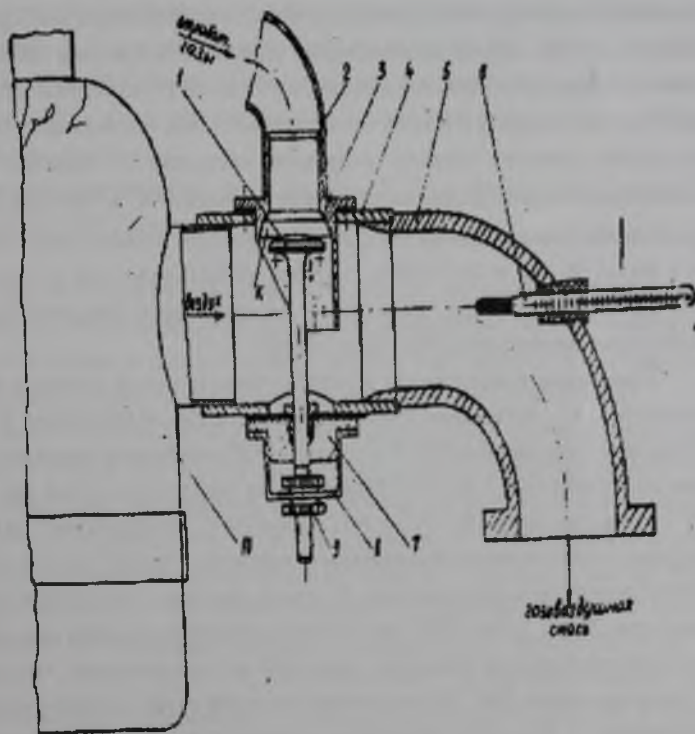


Рисунок 1  
Конструктивная схема перепускного устройства для РОГ

Методика исследования была следующей. При неизменных скоростных и нагрузочных режимах и установленном значении количества РОГ после достижения постоянства теплового состояния и температуры ОГ производились замеры:

расходов воздуха и топлива; температур ОГ и газовой смеси; входящей и выходящей из калориметров воды; давлений и расходов воды в калориметрах; содержание сажи в ОГ; снимались диаграммы давлений в цилиндре в пределах всего цикла, в том числе и с выключенной подачей топлива. РОГ для каждого режима работы изменялась в широких пределах. Сравнительные экспериментальные исследования (СЭИ) начинались без РОГ и далее снимались 4-6 точек с РОГ до момента чрезмерного дымления: степень РОГ не менее четырёх раз изменялась на режимах средних, номинальных и близких к ним нагрузок и частот (НБНЧ) и не менее шести раз - на режимах холостого хода (ХХ), малых нагрузок и частот вращения (МНЧ). Оптимум степени РОГ определяется по положению рейки топливного насоса ( $l_p$ ): РОГ-оптимальна тогда, когда показание прибора ЭИВ2-12 минимально. При снятии индикаторных диаграмм без подачи топлива важно обеспечить процесс сжатия таким же, как и с подачей. В этом случае линии сжатия диаграмм как с подачей, так и без топлива совместятся, что позволяет более точно определить момент начала видимого сгорания и период задержки самовоспламенения ( $\tau_1$ ). При исследовании влияния РОГ на показатели цикла в первом приближении одинаковый состав и параметры заряда к концу наполнения как с подачей, так и без подачи топлива устанавливаются по температуре газовой смеси ( $t_{гвс}$ ). Эта методика использовалась благодаря РОГ во всех наших исследованиях как с РОГ, так и без РОГ.

Программа исследования предусматривала пуски дизеля в интервале температур  $t_o$  и  $t_{дв}$ , возможном в зимний период в Северном Казахстане. Фактически произведено 13 пусков без РОГ и 17 пусков с РОГ, охватившие диапазон теплового состояния дизеля от -1,5 до -34°C. Минимальная температура дизеля при пуске без РОГ составляла минус 29,5°C, с РОГ - минус 34°C. В отдельные пуски дизель прогревался при  $n = \text{const}$  до температуры охлаждающей жидкости и масла (50-60°C) с регистрацией динамики прогрева. В период прогрева через равные интервалы температур ДВС ( $t_{дв}$ ) как с РОГ, так и без РОГ производился замер расхода топлива для выявления влияния подогрева заряда ОГ на экономичность при различном тепловом состоянии ДВС. До выполнения операций пуска картерное масло дизеля прогревалось с помощью электроподогревателя до +15-18°C. Одновременно проводилась подготовка измерительных приборов к работе и дизеля к запуску.

Процесс пуска дизеля для всех температур состоял из трех периодов: прогрева пускового двигателя после его пуска в течение одной минуты, проветывания коленвала дизеля без подачи топлива в цилиндры с включенным декомпрессионным механизмом также в течение одной минуты и, наконец, пуска с максимальной подачей топлива до момента самостоятельной работы дизеля. Регистрация параметров пуска

прекращалась в момент появления первых устойчивых вспышек в цилиндрах двигателя. Этот момент определялся визуально по характеру выхлопа и по началу ускорения отсчёта и счётчиками импульсов. Очередной пуск производился после выравнивания температуры двигателя с  $t_0$ . При каждом пуске дизеля производилась регистрация суммарных  $n$  за весь период пуска и за период пуска с подачей топлива. Для этих измерений использовались два счетчика импульсов СБ1М/50, прерыватели которых срабатывали от одного кулачка. Последний был установлен на хвостовике вала отбора мощности трактора. Регистрация температуры среды в выпускном (при пусках без РОГ) и во впускном (при пусках с РОГ) коллекторах производилась на диаграммную ленту (скорость её движения составляла 4,8 м/ч) потенциометра ЭПП-09МЗ в виде непрерывной линии. За период пуска дизеля измерения расходов топлива производились за 3-5 с до момента подачи топлива и в момент первых устойчивых вспышек в цилиндрах. Разность показаний весов и определяла пусковой расход топлива. В опытах для измерения расхода топлива использовались весы ВНЦ-2 с ценой деления шкалы 2 г.

Средняя концентрация паров топлива (КПТ) в перепускаемой смеси (при пусках дизеля с РОГ) определялась из выражения:

$$G_{ТСМ} = (G''_{\phi} - G'_{\phi}) / V_{\phi}, \text{ мг/л,}$$

где  $G''_{\phi}$  и  $G'_{\phi}$  - вес бумажного фильтра соответственно до и после пропускания через него смеси;  $V_{\phi}$  - объём смеси, пропущенной через фильтр. Смесь просасывалась в течение всего периода пуска с подачей топлива через фильтр путем создания в фильтрующем устройстве разрежения при сливе воды из мерного бачка.

Следует отметить, что КПТ в перепускаемой смеси в разные моменты пуска различна: в первых циклах она равна нулю, затем постепенно возрастает, в последующем через определенное время остается почти неизменной до момента появления в цилиндрах дизеля очагов горения, после чего КПТ в смеси снижается, а его место занимают продукты сгорания топлива. Отключение фильтрующего устройства производилось в момент появления следов черного дыма на выхлопе. Пуски дизеля по изложенной методике предварительно были отработаны при изменении  $t_0$  от 0 до минус 10°C, что позволило в дальнейшем успешно вести экспериментальные исследования пусковых качеств дизеля и при более низких  $t_0$ .

До проведения исследования дизель прошел обкатку в течение 60 моточасов по программе, рекомендованной заводом-изготовителем. Характеристики дизеля снимались по общепринятой методике с соблюдением условий ГОСТа 18509-73, 18509-80 на испытания тракторных и комбайновых двигателей.

Сравнительные экспериментальные исследования (СЭИ) дизелей с РОГ и без РОГ, а также ТС с серийными пружинными форсунками со сливом топлива на землю и форсунками с глухим колпаком без слива топлива на землю проводились

в лабораториях ДВС ПГУ, где, начиная с 1972г, были спроектированы, созданы и совершенствовались экспериментальные установки с дизелями А-41 (4Ч13/14) и Д-440 (4ЧН13/14;  $V_s=7,43$  л;  $N_s=69,9^{+3,5}$  кВт  $\approx 95^{+5}$  л.с.), электротормозом постоянного тока с весовым устройством ВКМ-57, электрагрегатом питания и рекуперации, пультом и станцией управления электротормозом, батареей нагрузочных сопротивлений электротормоза, индикатором МАИ-2, установками для измерения расходов топлива и воздуха, устройством для РОГ, муфтой  $\Theta_{впр}$ , приборами для измерения:  $n$ ; температур различных сред; давлений топлива за фильтром и масла в главной масляной магистрали; окружающей среды, газа во впускном и выпускном коллекторах; дымности ОГ и их химического анализа [1-3]. Внешняя нагрузка на испытуемый дизель создавалась динамомашиной МПБ 32,7/28 мощностью 100 кВт с  $n_{мин}$  ротора до 3500 мин<sup>-1</sup>. Электрические схемы главной цепи и цепи управления обеспечивают работу электротормоза как по схеме «Генератор-Двигатель», так и на нагрузочное сопротивление  $R_H$ . Агрегат питания и рекуперации составляют генератор постоянного тока типа П102, асинхронный электродвигатель А101-4М с короткозамкнутым ротором и возбудитель П51, установленные на общей фундаментной раме. Валы всех машин соединены упругими муфтами. П102 электрически связан с электротормозом. Блок сопротивлений  $R_H$  из четырех ступеней включен последовательно в главную цепь, дополнительно ограничивающий пусковой ток, а следовательно, и  $n$  дизеля при запуске. П51 обеспечивает питание постоянным током обмотки возбуждения электротормоза, генератора П102 и катушки пускорегулирующей аппаратуры. При прокрутке коленвала дизеля или рекупиративном торможении тормозная установка работает по схеме «Генератор-Двигатель». Изменение нагрузки на дизель осуществляется изменением тока возбуждения с помощью реостатов и  $R_H$ . В случае работы на нагрузочное  $R_H$  агрегат питания и рекуперации отключается от трёхфазной сети лаборатории, цепь управления электротормоза подключается к выпрямителю ВК-200. Другой особенностью тормозной установки является возможность разгона агрегата питания и рекуперации до включения электродвигателя А101-4М на сеть лаборатории, что предохраняет сеть от высоких пусковых токов и уменьшает динамические нагрузки в самом электроприводе в период пуска. Разгон агрегата производится П51 при его включении в сеть постоянного тока выпрямителя ВК-200. Для ограничения пускового тока П51 и плавного разгона агрегата предусмотрен реостат РВК-200. Одновременное с включением П51 шунтирование серийной обмотки исключает изменение полярности П51 при переходе из двигательного режима в генераторный, т.е. после включения А101-4М на сеть, чем существенно упрощена электросхема.

Практический интерес представляет также установка индукционного преобразователя отметчика (ИПО) и преобразователя электротактометра (ПЭ) и

двигателя на картере распределительных шестерён (КРШ). ИПО винтами закреплён на кронштейне из разнобокого уголка размером 140x90x10, закреплённого гайками на двух удлинённых (по сравнению с существующими) шпильках. Так как плоскость бобышек отверстий шпилек несколько выступает за плоскость крышки КРШ, то между вертикальной полкой кронштейна и этой плоскостью установлена стальная прокладка. Якорь ИПО ВМТ из листовой магнитомягкой стали крепится двумя болтами совместно с храповиком к шкиву коленвала. Вершина якоря описывает окружность диаметром 320 мм, что обеспечивает чёткую работу ИПО при вращении коленвала, чему способствует также окно на вершине якоря. Установка ПЭ непосредственно на двигателе продиктована необходимостью исследования работы дизеля на ХХ с выключенной муфтой сцепления, т.е. без маховых масс электротормоза. Узел привода ПЭ заимствован от гибкого валопровода подобных ПЭ. Привод ПЭ осуществляется шестерней привода топливного насоса высокого давления (ТНВД) посредством поводка. Между вентилятором и шкивом привода водяного насоса и вентилятора установлена проставка, исключаящая задевание лопастей вентилятора за ИПО и ПЭ при работе двигателя.

Положения рейки ( $I_p$ ) ТНВД на установившихся режимах работы двигателя регистрировались электронным прибором с дифференциально-трансформаторным принципом действия (ЭИВ2-12) с ценой деления шкалы 0,02 мм. ЭИВ2-12 позволяет оценивать степень влияния того или иного воздействия на двигатель по изменению  $I_p$  для одного и того же скоростного режима работы дизеля.

Система воздухообеспечения двигателя включала в себя расходомер, ресивер и воздухопровод. Забор воздуха осуществлялся как снаружи, так и из помещения лаборатории, расширяя температурный диапазон поступающего воздуха. Пульсации потока воздуха, поступающего в цилиндры двигателя, сглаживались в ресивере, объём которого более чем в 200 раз превышает объём одного цилиндра.

Усовершенствованы методы измерения  $n$ , расходов топлива и воздуха [1-3]. На специальном диске на одном уровне выполнены 60 отверстий для измерения мгновенной  $n$ , на втором уровне выполнено одно отверстие для измерения суммарной  $n$  за время счёта. Электронно-цифровой частотомер ЧЗ-33 используется как генератор эталонных частот для питания расходомера топлива типа Д1 и как счётчик-накопитель при измерении расхода воздуха за время расходования заданного количества топлива. В качестве расходомера воздуха использован нагнетатель типа РУТС, приводимый во вращение за счет перепада давлений на входе и выходе нагнетателя. Согласно паспортным данным на измерителе цифровом тахометрическом (ИЦТ) основная допускаемая погрешность не более 0,015%, а время измерения - 1 с, причём отсутствует мерцание цифр и на табло высвечивается готовый результат. Расходомер типа Д1

имеет весы с навесками и ёмкостью для топлива, электромагнитный клапан, управляющий доливом топлива, пульт управления, в котором расположены счётчики времени и п, причём автоматика пульта управления обеспечивает работу расходомера в режимах замера топлива, контроля п и питания двигателя топливом в периоды длительной работы без измерений. Погрешность измерения веса дозы топлива равна 0,2%; времени  $-(0,002 t_{изм} + 0,02)$  с, где  $t_{изм}$  - показания счётчика времени. Погрешность счёта суммарной  $n-2$  импульса (оборота) за время счёта. В целях повышения качества и точности измерений показания электронного тахометра контролировались приставным тахометром часового типа СК-751.

Системы охлаждения и смазки оборудованы теплообменными аппаратами, обеспечивающими заданное тепловое состояние и определение составляющих внешнего теплового баланса. Теплообменник в системе охлаждения работает по принципу подмешивания воды из водопровода, добавляемое количество которой зависит от теплового состояния дизеля и устанавливается автоматическим регулятором прямого действия (АР). Теплообменник масла выполнен так: масляный радиатор дизеля СМД-7 вварен в металлический сосуд патрубками подвода и отвода водопроводной воды. Теплообменники теплоизолированы. Количество тепла, отведённого от двигателя системой охлаждения и смазки, определялось по замеренным весовым расходам воды в каждом из систем по температурам на входах и выходах.

Система отвода ОГ двигателя рассчитана на такое же сопротивление выпуску, как и на тракторе. Для определения количества тепла ОГ выпускной тракт оборудован калориметром. В целях интенсификации теплообмена внутри выхлопного трубопровода установлен завихритель, представляющий спиральную ленту. Калориметр обеспечивает весьма интенсивный теплообмен. Например, на  $N_{сн}$  снижение  $t_c$  достигает 40-50°C, температура воды повышается до 40°C. Температуры воды на входе и выходе калориметра измеряются ртутными термометрами с ценой деления шкалы 0,2°C, а  $t_c$  (в выхлопном коллекторе и после каждого цилиндра) - хромель-алюминиевыми термопарами ТХА-8, работающими в комплекте с электронным потенциометром ЭПП09-М3 класса 0,5 с пределом измерений от 0 до 800°C.

Давления масла и топлива замерялись мембранными манометрами, газа во впускном и выпускном коллекторах - ртутными дифманометрами. Химический анализ ОГ осуществляется на газоанализаторе ВТИ-2. Параметры окружающей среды регистрировались: давление - анероидом; температура - ртутным термометром; относительная влажность - психрометром «Август».

Дымность ОГ определялась по содержанию сажи (мг/л) в бумажном фильтре после просасывания через него известного объема ОГ с последующим взвешиванием



на аналитических весах. Чистые фильтры тоже взвешивались. Объем пропускаемых через фильтр ОГ составлял 3-15 л в зависимости от сажеосодержания ОГ. Дымность ОГ определялось фотоэлектрическим дымомером.

При монтаже комплекта индикатора МАИ-2 особое внимание было обращено на расположения индикаторного канала в головке цилиндров (ИКГЦ), так как от этого зависит качество записи, а следовательно, и точность индицирования. Для повышения качества записи диаграмм ИКГЦ был выполнен в области 4-го цилиндра так, что его отверстие более чем наполовину сообщалось с камерой сгорания (КС) в поршне. Следует отметить, что на АМЗ индицирование проводится с ИКГЦ, не сообщаемым с объемом КС в поршне. Для регистрации на индикаторных диаграммах моментов начала и конца подъема иглы (МНКПИ) форсунки были изготовлены и испытаны два варианта контактных преобразователей, установленных в колпаке форсунки и увеличившими вес дополнительных масс подвижных деталей форсунки примерно на 15%. При работе тириatronного преобразователя индикатора МАИ-2 в режиме «замыкание-размыкание вместе» на диаграмму наносились две линии, соответствующие МНКПИ.

#### Программа исследований РОГ была следующей

1. Испытания дизеля с РОГ на режимах: пуска и послепускового прогрева при 800; 1000; 1200 мин<sup>-1</sup> без нагрузки и с нагрузкой до 0,15  $N_{ном}$ ;  $n_{ххmin}$  и изменении угла опережения впрыскивания топлива ( $\Theta_{впр}$ ) от 20 до 29°ПКВ до верхней мертвой точки (ВМТ) через 3° по мениску;  $n_{ном} = 1750$  мин<sup>-1</sup> и нагрузках 0,10,25 и 50% от номинальной (90 л.с.) при разных  $\Theta_{впр}$  с целью выявления влияния РОГ на показатели РПД и устойчивости его работы;  $n_{ном} = 1750$  мин<sup>-1</sup> и нагрузках 0,10,25 и 50% от номинальной при изменении на каждой нагрузке температуры выходящей из двигателя охлаждающей воды от 50 до 80°С с интервалом в 10°С.

2. Разработка, испытание и совершенствование системы автоматического регулирования РОГ после установления оптимального закона регулирования РОГ.

**Влияние РОГ на пусковые качества дизеля А-41 при отрицательной  $t_0$**  исследовано на специально оборудованном двигателе трактора ДТ-75М «Казахстан», который был установлен на открытой площадке. Приборы для регистрации параметров пуска располагались в теплом помещении. До проведения исследований было выполнено сезонное техобслуживание двигателя, включающее замену горючесмазочных материалов на зимние сорта, регулировку топливной системы, механизма газораспределения и пускового двигателя. Система охлаждения двигателя была заправлена антифризом. На двигателе был установлен отрегулированный и обкатанный новый пусковой двигатель. РОГ регулировался заслонкой с ручным управлением, установленной в перепускаемой трубе. Двигатель

трактора был оборудован приборами для измерения: расходов топлива и воздуха, температур среды на впуске и выпуске, охлаждающей жидкости и масла, суммарных частот вращения ( $n$ ) и прибором для определения количества топлива в перепускаемой смеси. Расход топлива за период пуска измерялся весовым способом. Весы расходомера располагались в помещении лаборатории. Трехходовой кран расходомера топлива медной трубкой соединялся с фильтром грубой очистки. Для измерения расхода воздуха использовался расходомер мгновенного расхода, указатель которого также устанавливался в помещении лаборатории. Измерение температур указанных выше сред производилось хромель-копелевыми (ХК) термопарами, работающими в комплекте с электронным потенциометром ЭПП-09МЗ с пределом измерения температур от  $-50$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ . Термопары были изготовлены из проволоки диаметром  $0,2$  мм. Суммарные  $n$  за период пуска измерялись счетчиками импульсов марки СБ1М/50. Количество топлива в перепускаемой смеси измерялось путем улавливания паров топлива бумажным фильтром при просасывании через него известного объема смеси. Для этой цели двигатель был оборудован фильтрующим устройством, заборная трубка которого размещалась в перепускаемой трубе.

Конструкция узла регулирования устройства для РОГ (УРОГ) предусматривает автоматическое управление клапаном следящим приводом любого принципа действия. Испытана электронная система РОГ, основанная на принципе уравнивающего преобразования входных сигналов. В качестве преобразователей нагрузки, частоты ( $n$ ) и обратной связи (клапана в УРОГ) использованы дифференциально-трансформаторные преобразователи перемещений. Система обеспечивает качественное регулирование РОГ в любых условиях работы дизеля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование тракторного дизеля на режимах малых нагрузок, оборотов и холостого хода: Отчет о НИР (промежуточн.) /ПИИ; Рук. Каракаев А.К.; №ГР76072056; Инв. №Б609046.–Павлодар, 1977.–44 с.
2. Исследование тракторного дизеля А-41 на режимах малых нагрузок: Отчет о НИР (промежуточн.) /ПИИ; Рук. Каракаев А.К.; № ГР 77070245; Инв. № Б683718.– Павлодар, 1978.–152 с.
3. Исследование тракторного дизеля А-41 на режимах малых нагрузок: Отчет о НИР (заключительн.) /ПИИ; Рук. Каракаев А.К.; № ГР 77070245; Инв. № Б987264.– Павлодар, 1981.–139 с.
4. Кривенко Б.М., Каракаев А.К. Уменьшение износа и повышение экономичности тракторных дизелей путём улучшения теплового состояния двигателей //Пути ускорения технического прогресса и повышения его

эффективности на машиностроительных предприятиях Казахстана: Тез. докл. РНТК.–А.-А.,1976.– С.79-80.

5. Пути повышения эффективности использования дизелей в условиях Павлодар-Экибастузского ТПК /Каракаев А.К., Кривенко Б.М., Ахметниязов Ж.Ж. и др. //Повышение эффективности использования минерально-сырьевых ресурсов Павлодар-Экибастузского ТПК: Тез. докл. Республиканской научно-технической конференции.–Павлодар, 1979.– С. 96-97.

6. Повышение экономичности и надежности работы дизелей/Кривенко Б. М., Каракаев А.К., Довгань А.Л. и Лебсак В.Я. //Повышение эффективности использования минерально-сырьевых ресурсов Павлодар-Экибастузского ТПК: Тез. докл. Республиканской научно-технической конференции.–Павлодар, 1979.–С. 102.

7. Кривенко Б.М., Каракаев А.К. Повышение эффективности использования тракторов на погрузочно-разгрузочных и транспортных работах на предприятиях машиностроения //Пути повышения механизации и автоматизации тяжелых ручных и вспомогательных работ в машиностроении Казахстана: Тез. докл. Республиканской научно-технической конференции.–А.-А.–1979.-С. 64-69.

8. Кривенко Б.М., Каракаев А.К. Исследование влияния рециркуляции невоспламенившейся смеси на пусковые качества холодного дизеля //Тез. докл. Всесоюзной научно-технической конференции, посвященной 150-летию МВТУ им. Н.Э. Баумана.–М.-1980.–С. 71-72.