

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ВОДОТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ НА ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДИЗЕЛЯ

А.М.А. Аття, асп., А.Р. Кульчицкий, д.т.н.
ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет им. Столетовых»

Одним из перспективных способов обеспечения малотоксичного сжигания традиционных топлив с улучшением или без ухудшения топливной экономичности дизелей является применение водотопливных эмульсий. Приведено описание методики управления структурой ВТЭ на стадии ее приготовления при использовании метода мембранного эмульгирования, а также представлены результаты исследования влияния ВТЭ с заранее заданной структурой на экологические и экономические показатели двигателя и характеристики горения ВТЭ.

В настоящее время одной из наиболее актуальных задач является необходимость обеспечить экономичный и малотоксичный рабочий процесс дизелей за счет применения либо альтернативных топлив, либо смесевых топлив на базе традиционного дизельного топлива (ДТ). К последним относятся водотопливные эмульсии (ВТЭ), получаемые посредством введения воды в ДТ. Водотопливная эмульсия представляет собой систему несмешивающихся жидкостей: вода в форме мельчайших капель внутри топлива с добавлением эмульгатора для снижения межфазного натяжения и предотвращения расслоения эмульсии. При этом все физические свойства эмульсионного топлива изменяются по закону смеси (в зависимости только от содержания воды), кроме вязкости. Вязкость ВТЭ возрастает с увеличением объемного содержания воды до 63,7 % (при котором происходит фазовая инверсия эмульсии из «вода внутри топлива» на «топливо внутри воды»); при дальнейшем увеличении содержания воды вязкость уменьшается.

В критических условиях перегрева воды, характерных для КС дизеля (500–650 °С и 60 бар в момент начала впрыскивания ВТЭ), вода превращается в пар за счет кипения, а ДТ — за счет испарения, поэтому вода быстрее завершает фазовое превращение по сравнению с ДТ. В результате продолжения теплообмена объем паровой оболочки расширяется против поверхностного натяжения окружающего топлива, и когда нарас-

тание давления превышает поверхностное натяжение, возникает принудительное разбивание буферного топлива на более мелкие частицы [1, 2]. В результате этого площадь поверхности испарения возрастает, приводя к повышению скорости испарения ДТ. Это явление дробления ВТЭ называется процессом «микровзрыва», а рост испарения в результате дробления ДТ называется «вторичным испарением». Еще одной причиной дробления капель эмульсии является разрушение струи ВТЭ вследствие упругого удара о стенку камеры сгорания [3].

Основными факторами, влияющими на силу микровзрыва в критических условиях, является размер капель воды d в эмульсии, объемное содержание воды C_v и начальный радиус капель эмульсии R_0 — увеличение размера диспергированной капли до определенной величины улучшает процесс горения и увеличивает температуру в области, близкой к соплу форсунки. Совокупное влияние этих параметров определяет возможность возникновения микровзрыва [4 и 5]:

$$(R_0^3 - R_1^3)(1 - C_v) = [(R_1 + d)3 - R_1^3],$$

где R_1 — радиус образованной оболочки топлива.

Таким образом, если C_v очень большое или R_0 очень мал, то топливная оболочка не образуется, вследствие чего микровзрыв возникает, только если $R_1 \gg d$ (рис. 1).

Вода при высокой температуре в зоне реакции диссоциирует на активные радикалы (OH^- и H^+), способствуя окислению продуктов неполного сгорания ДТ: оксида углерода CO , суммарных уг-

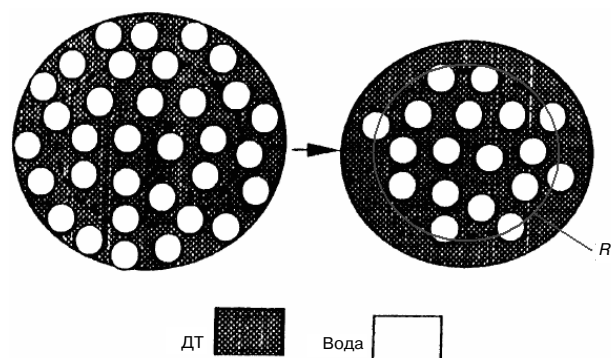
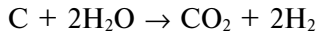


Рис. 1. Образование топливной мембраны

леводородов C_nH_m и углерода C . Кроме того, взаимодействие сажи (углерода) и углеводородов топлива с парами воды приводит к выделению водорода, что фактически приводит к увеличению тепловыделения вследствие его последующего сгорания [6]:



и



В то же время в результате затрат энергии на испарение воды и ее диссоциацию температура горения уменьшается, приводя к снижению скорости окисления азота и, соответственно, к уменьшению концентрации оксидов азота NO_x в отработавших газах (ОГ).

Основным фактором, определяющим воздействие на рабочий процесс двигателя в случае применения воды вообще и ВТЭ в частности, всегда считалось соотношение «вода/топливо». Однако невысокая воспроизводимость результатов влияния ВТЭ на мощностно-экономические и экологические характеристики двигателей указывает на наличие фактора (или факторов), которые оказывают значительное воздействие на рабочий процесс двигателей. Ключом к пониманию подобных различий, по мнению авторов, является структура эмульсии, т. е. характер распределения среднего размера капель воды в топливе и степень однородности этого распределения по размерам. Первое определяет площадь контакта воды и топлива и интенсивность испарения воды при нагреве, т. е. влияет на такие процессы в камере сгорания дизеля, как макросмещение ВТЭ с окислителем и термохимические показатели процесса ее горения. А второе обуславливает степень однородности эмульсии и оказывает влияние на ее физические параметры. Так, например, при горении ВТЭ на базе тяжелых топлив чем мельче размер капель воды, тем меньшее количества воды необходимо для получения одинакового эффекта по снижению эмиссии сажи [2].

Управление структурой эмульсии позволит получать ВТЭ заранее заданного состава и, соответственно, обеспечивать стабильность и воспроизводимость результатов их применения. Это зависит, в первую очередь, от технологии приготовления эмульсии. В большинстве работ ВТЭ готовились с использованием гомогенизаторов, ультразвуковых устройств или других механических методов, которые не могут обеспечивать стабильность структуры эмульсий [7, 8].

Эта проблема решена в данной работе применением метода мембранного эмульгирования с использованием смесового эмульгатора для повышения стабильности эмульсий. Принцип работы мембранного эмульгирования заключается

в том, что вода (как дисперсная фаза) перемещается под невысоким давлением (больше капиллярного давления) через поры мембраны (размером в несколько микрометров), приводя к образованию капель воды на выходе из мембраны, которые в дальнейшем отделяются с поверхности мембраны потоком топлива (как дисперсной среды) за счет силы вязкого трения. Применение мембранного эмульгирования обеспечивает получение монодисперсной эмульсии, причем чем меньше диаметр пор, тем выше монодисперсность эмульсии и тем меньше диаметр дисперсной фазы внутри дисперсной среды [9, 10, 11]. Таким образом, при приготовлении ВТЭ изменение диаметра пор мембраны или содержания дисперсной фазы (воды) приводит к

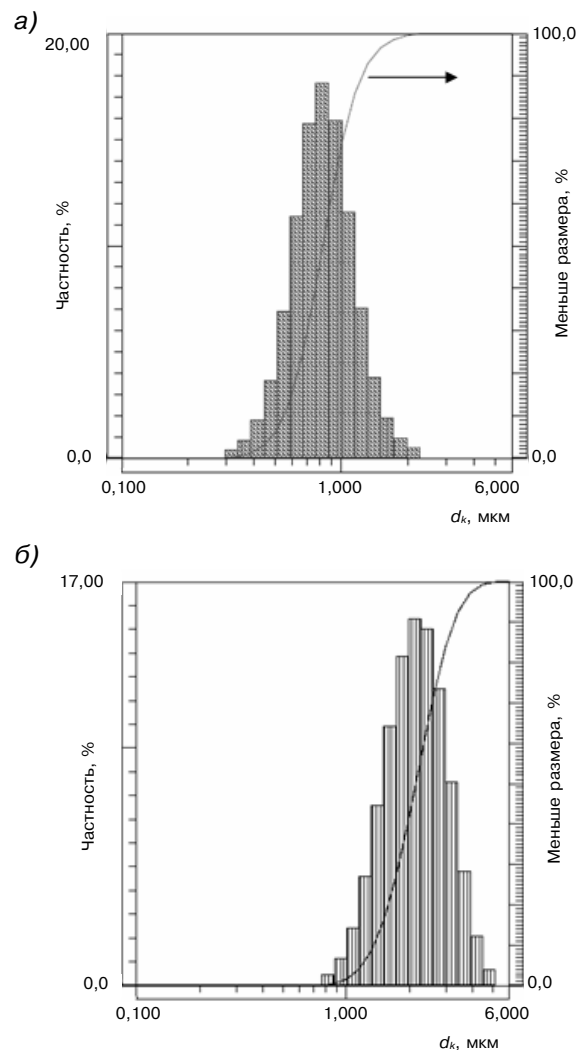


Рис. 2. Распределение по размерам капель воды в ВТЭ через 10 дней после ее получения с помощью мембраны с размером пор 0,2 мкм:

а — содержание воды 21,4 %, $D_{90} = 1,3$ мкм, $D_{50} = 0,8228$ мкм, $D_{10} = 0,547$ мкм; $\delta \approx 0,91$;
б — содержание воды 34,8 %, $D_{90} = 3,4$ мкм, $D_{50} = 2,1443$ мкм, $D_{10} = 1,414$ мкм; $\delta \approx 0,93$

изменению структуры получаемой эмульсии при обеспечении высокой стабильности распределения по размерам (рис. 2).

В настоящей работе процесс приготовления ВТЭ был реализован на экспериментальной установке, созданной на ЗАО «Владисарт», г. Владимир [12]. Мембрана представляла собой керамический цилиндр длиной 22 см, внутренним диаметром 6 мм, внешним диаметром 10 мм, с диаметром пор 0,20 мкм (или 0,45 мкм) и пористостью 50 %. Структуры получаемых эмульсий определены на оптическом микроскопе (МИКРОМЕД 3–20 с видеоокуляром DCM-510, производство КНР) (например, рис. 3), распределение по размерам капель воды измерено на анализаторе размеров частиц с динамическим рассеиванием лазерного света (Horiba LB-550, производство Японии) (см. рис. 2). Степень дисперсности эмульсии определена по коэффициенту дисперсности δ , который показывает степень однородности размеров образованных капель [10]:

$$\delta = (D_{90} - D_{10})/D_{50},$$

где D_{90} , D_{50} и D_{10} — диаметры капель, соответствующие 90, 50 и 10 % об. на интегральной кривой распределения по размерам.

Чем меньше величина δ , тем меньше разброс по размерам; при этом если δ менее 0,5, то эмульсия считается монодисперсной. Структура одной из ВТЭ (например, см. рис. 2), характеризуется следующими величинами: симметричное (нормальное) распределение капель воды с величиной $\delta \approx 0,9$. Течение топлива внутри цилиндрической мембраны было ламинарным (во всех экспериментах число Рейнолдса не превышает 800), но распределение по размерам показало симметричность относительно средней величины. Это означает, что при изменении динамики течения топлива до высокой турбулентности эмульсия будет монодисперсной с малым размером капель воды [10].

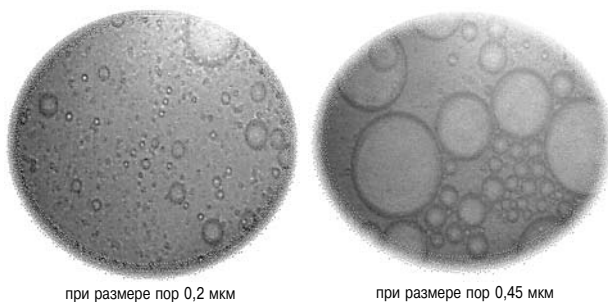


Рис. 3. Изменение структуры одинаковых ВТЭ (после более месяца их получения) в зависимости от диаметра пор мембраны (объемное содержания воды 17 %, эмульгатора 0,5 %).
Ширина кадра ≈ 130 мкм

Увеличение содержания воды в ВТЭ увеличивает значение вязкости ВТЭ [12]. Этот эффект объясняется искажением картины течения слоев жидкости при наличии частиц, намного превосходящих по размеру молекулы жидкости: из-за значительного влияния гидродинамического взаимодействия между каплями воды в топливе повышается коэффициент внутреннего трения и изменяется структура ВТЭ. Вязкость (как важный фактор) необходимо учитывать при использовании ВТЭ как в дизелях, так и в ДВС с впрыском бензина, и в газотурбинных установках, поскольку это будет приводить к изменению характера распыливания топлива в КС.

Кроме содержания воды, на вязкость эмульсии влияют разные параметры, в том числе размер капель воды и распределение капель по размерам. Были приготовлены разные эмульсии за счет изменения размера пор мембраны. Увеличение диаметра пор мембраны приводит к образованию более крупных капель воды и ухудшению степени однородности (см. рис. 3). Результаты измерения вязкости получаемых эмульсий с различной структурой показали уменьшение вязкости при увеличении размера пор мембраны (рис. 4). Это совпадает с результатами работ [13, 14] — чем меньше размер капель воды, тем больше вязкость эмульсии и тем выше однородность распределения по размерам. Для ВТЭ чем крупнее капли, тем меньше вязкость, но вязкость любой ВТЭ больше по сравнению с вязкостью чистого ДТ.

Оценка влияния структуры ВТЭ на мощностно-экономические и экологические характеристики двигателя выполнена на трехцилиндровом дизеле воздушного охлаждения с турбонаддувом ЗЧН10,5/12. Основные средства измерения: расходомер топлива 730 (AVL, Австрия), расходомер воздуха РГ-400 (Россия), газоанализатор DiCom-4000/NO_x (AVL, Австрия), и дымомер 415S (AVL, Австрия). Испытания проводились на режимах согласно требованиям ГОСТ Р 41.96–2005

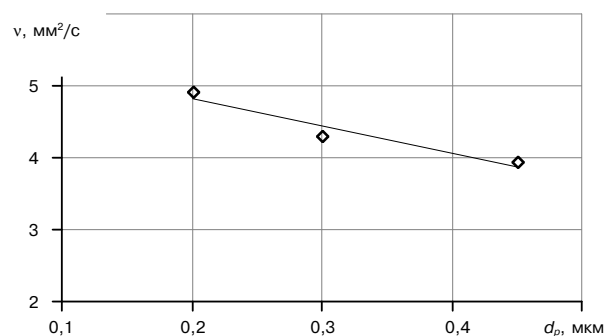


Рис. 4. Изменение вязкости ВТЭ (ν) в зависимости от диаметра пор использованной мембраны (при температуре 22 °С)

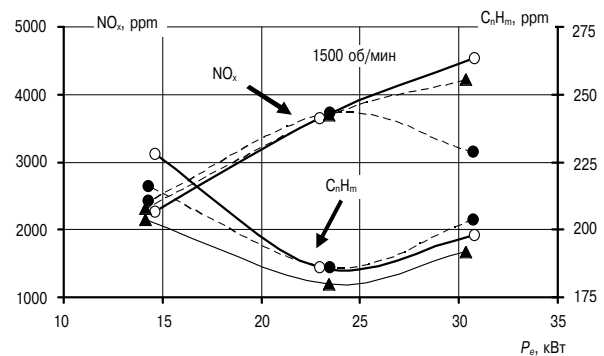
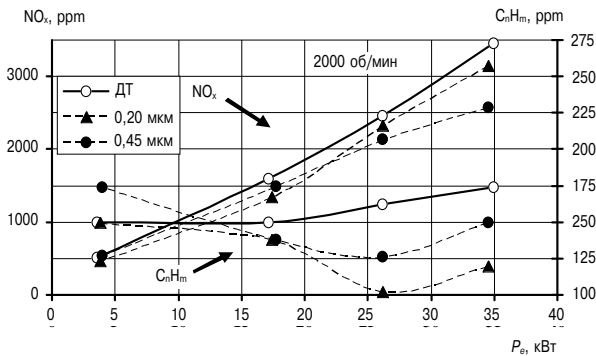


Рис. 5. Изменение концентрации оксидов азота NO_x и суммарных углеводородов C_nH_m в зависимости от мощности двигателя на разных скоростных режимах.

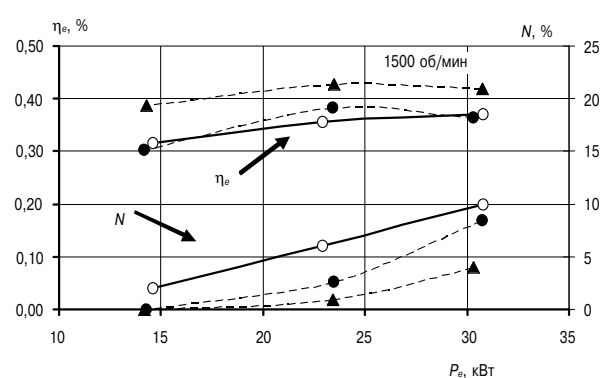
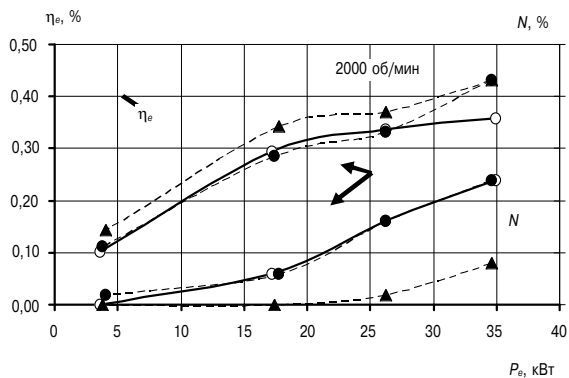


Рис. 6. Изменение эффективного КПД η_e и дымности N ОГ в зависимости от мощности двигателя на разных скоростных режимах

(Правила ЕЭК ООН № 96-01). Комплектация двигателя штатная за исключением фильтра тонкой очистки, который был снят для предотвращения возможной фильтрации воды. В качестве топлива использовались летнее ДТ и два вида эмульсии одинакового состава (с объемным содержанием воды 17 % и содержанием смесового эмульгатора 0,5 %), приготовленные с помощью мембран с порами 0,20 и 0,45 мкм.

Результаты моторных испытаний показали следующее (рис. 5 и рис. 6):

- применение ВТЭ по сравнению с ДТ обеспечивает снижение концентрации NO_x и C_nH_m в отработавших газах, а также уровня дымности ОГ;

- наиболее явное влияние ВТЭ на концентрацию NO_x и C_nH_m в ОГ, а также уровень дымности ОГ сказывается на режимах нагрузок более 75 % от полных;

- ВТЭ с более мелким размером капель воды обеспечивает большее снижение концентрации C_nH_m в ОГ и уровня дымности ОГ, а также большее увеличение эффективного КПД η_e ;

- ВТЭ с крупным размером капель обеспечивает большее снижение концентрации NO_x в ОГ;

- на режимах эксплуатационной мощности и максимального крутящего момента эффективный КПД η_e увеличился в 1,2 раза при применении ВТЭ, полученной с помощью мембран с порами 0,20 мкм, и в 1,06 раза — с порами 0,45 мкм.

Выводы

1. Создана установка, предложена методика и отработана технология получения ВТЭ методом мембранного эмульгирования, позволяющие получать ВТЭ заранее заданного состава с высокой степенью однородности.

2. Как увеличение содержания воды в ВТЭ, так и уменьшение среднего размера капель воды приводит к увеличению вязкости эмульсии, что необходимо учитывать при организации процессов топливоподачи и смесеобразования в ДВС с непосредственным впрыскиванием топлива.

3. При работе двигателя на ВТЭ одинакового состава, но с различной структурой отмечено влияние структуры эмульсии как на экологические, так и экономические показатели двигателя:

- увеличение эффективного КПД η_e в широком диапазоне нагрузок и частот вращения коленчатого вала (максимальное увеличение отме-

чено на режиме эксплуатационной мощности: с 0,35 до 0,43);

➤ снижение концентрации NO_x и C_nH_m в отработавших газах, а также уровня дымности отработавших газов на режимах нагрузок в основном более 75 % от полных;

➤ большее влияние ВТЭ с крупным размером капель воды на эмиссию NO_x , а с меньшим размером — на уровень дымности ОГ и эмиссию C_nH_m .

Литература

1. *Watanabe H., Suzuki Y., Harada T., Matsushita Y., Aoki H., Miura T.* An experimental investigation of the breakup characteristics of secondary atomization of emulsified fuel droplet // *Energy*. — 2010. — Vol. 35. — P. 806–813.

2. *Lif A., Holmberg K.* Water-in-diesel emulsions and related systems // *Advances in Colloid and Interface Science*. — 2006. — Vol. 123. — N 126. — P. 231–239.

3. *Новиков Л.А., Борецкий Б.М., Вольская Н.А.* Механизм влияния состава водо-топливных эмульсий на смесеобразование в дизелях с неразделенными открытыми камерами сгорания // *Двигателестроение*. — 1996. — № 1. — С. 35–40.

4. *Fu W., Gong J., Hou L.* There is no micro-explosion in the diesel engines fueled with emulsified fuel // *Chinese Science Bulletin*. — 2006. — Vol. 51. — N 10. — P. 1261–1265.

5. *Fu W.B., Hou L.Y., Wang L., Ma F.H.* A unified model for the micro-explosion of emulsified droplets of oil and water // *Fuel Processing Technology*. — 2002. — Vol. 79. — P. 107–119.

6. *Горячкин А.В.* Влияние содержания влаги в зоне горения на эмиссию оксидов азота и серы // *Наукові праці Техногенна безпека*. — 2004. — Вып. 18. — Т. 31. — С. 27–37.

7. *Strandell P.A., Schab H.W.* A Review of water emulsified fuel investigations for shipboard applications // *Naval Engineers Journal*. — 1986. — P. 53–69.

8. *Столярчук Л.В., Черновец Е.Г., Асанов А.Ю.* Влияние способа подачи воды в цилиндр на экономичность и экологические показатели дизельного двигателя // *Двигателестроение*. — 2008. — № 4(234). — С. 52–55.

9. *Charcosset C., Limayem I., Fessi H.* The membrane emulsification process — a review // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. — 2004. — Vol. 79. — P. 209–218.

10. *Седышева С.А.* Разработка технологии эмульгирования жидкостей с применением керамических мембран: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М, 2011. — 18 с.

11. *Cheng C.J., Chu L.Y., Xie R.* Preparation of highly monodisperse W/O emulsions with hydrophobically modified SPG membranes // *Journal of Colloid and Interface Science*. — 2006. — Vol. 300. — P. 375–382.

12. *Амтия А.М.А., Кульчицкий А.Р.* Влияние введения воды на склонность к сажеобразованию дизельного топлива // *Современные проблемы науки и образования*. — 2012. — № 4.

13. *Ramirez M., Bullon J., Anderez J., Mira I., Salager J.L.* Drop size distribution bimodality and its effect on O/W emulsion viscosity // *J. Dispersion Science and Technology*. — 2002. — Vol. 23. — N 1–3. — P. 309–321.

14. *Pal R.* Effects of droplet size and droplet size distribution on the rheology of oil-in-water emulsions // *7th UNITAR International Conference for Heavy Crude and Tar Sands Proceedings to Helga Petri*. — 1998, Paper # 1998.05, Beijing, China. — 27–30 October.



ПОДПИСАНИЕ СОГЛАШЕНИЯ О СОЗДАНИИ R&D ЦЕНТРА

7 июля 2012 г. губернатор Георгий Полтавченко провел в Смольном рабочую встречу с генеральным директором компании AVL List GmbH и председателем Австрийско-Российского делового совета Хельмутом Листом. На встрече обсуждались вопросы сотрудничества Петербурга и австрийских компаний в сфере высоких технологий, научных исследований и подготовки квалификационных кадров.

Также на встрече в присутствии губернатора Санкт-Петербурга Г. Полтавченко было подписано соглашение между Санкт-Петербургским государственным политехническим университетом, AVL List GmbH и ОАО «Звезда» о создании R&D Центра дизельных двигателей и трансмиссий. Центр будет заниматься совместными проектами, в том числе по разработке современных типов высокоэффективных двигателей, по созданию гибридных силовых установок, разработке конкурентоспособных экологически безопасных транспортных средств.

ОАО «ЗВЕЗДА» ПРИНЯЛО УЧАСТИЕ В ВЫСТАВКЕ «РОССИЙСКИЙ ПРОМЫШЛЕННИК»

ОАО «Звезда» приняло участие в XVI Международном Форуме-выставке «Российский

промышленник», который прошел в ВК «Лен-экспо» с 25 по 28 сентября 2012 г.

За время проведения выставки стенд предприятия посетили представители Российских и зарубежных компаний, среди них были: ОАО «Авторесурс», ООО «Бриз», GrainEngineering, ЗАО «РУСВИЛ», ЗАО «Сатурн-Инструментальный завод», ОАО «Станкосфера» (Белорусь), ЦНТЦ «Гидравлика», ООО «Запчасти-Трейд», НПП «МоноТрон», Центр Инновационного развития «СИНАРА ТРАНСПОРТНЫЕ МАШИНЫ», Авиакомпания «Промышленная Авиация», ОАО «ДЕКА» и др.

Посетители стенда интересовались возможностями «Индустриального парка» ОАО «Звезда», размещением заказов на металлообработку на оборудовании ЦКД «Звезда».

Наибольший интерес вызвал новый проект по разработке базовых образцов модельного ряда высокооборотных дизельных двигателей для дизель-генераторных установок различного назначения в мощностном диапазоне 400–1700 кВт, реализуемый ОАО «Звезда» в рамках ФЦП «Национальная технологическая база».

За активное участие в выставке ОАО «Звезда» награждено почетным дипломом.