

## Перспективы использования детонационного сжигания топлива в энергетике и на транспорте

## Введение

Вопрос об использовании детонационного горения в реактивных двигателях и стационарных энергетических установках впервые поставлен Я. Б. Зельдовичем в 1940 г. [1]. По его оценкам, двигатели, использующие детонационное сгорание топлива, должны быть термодинамически более эффективными, чем двигатели, работающие на медленном (дефлаграционном) сжигании топлива. Это связано с тем, что при одинаковых начальных условиях продукты детонации горючей смеси обладают меньшей энтропией, чем продукты горения в замкнутом объеме ( $V = \text{const}$ ) и продукты горения при постоянном давлении ( $p = \text{const}$ ), и, следовательно, при изэнтропическом расширении продуктов в атмосферу большая часть химической энергии топлива превращается в полезную работу.

Практически одновременно с [1] появилась работа Г. Хоффмана [2] (цитируется по [3]), в которой опубликованы результаты экспериментов, направленных на изучение возможности использования детонационного сжигания топлива в периодическом генерируемых детонационных волнах для создания реактивной тяги. После работ Я. Б. Зельдовича и Г. Хоффмана систематических исследований не последовало. В 1950–1970 гг. появилось несколько публикаций о работах, в основном в США, позволяющих выяснить перспективность использования периодической детонации в воздушно-реактивных и ракетных двигателях летательных аппаратов (ЛА). Выяснилось, что для получения приемлемого удельного импульса необходимо сжигать топливо с высокой частотой генерации детонационных волн. Ввиду возникших технических сложностей организации пульсирующего процесса с периодическим заполнением камеры сгорания топливно-воздушной смесью (ТВС) и инициированием детонации был сделан вывод о целесообразности применения детонационного горения в двигателях ЛА.

В 90-е годы интерес к данной проблеме вновь возродился: появилось множество патентов и научных публикаций. В связи с последними достижениями микропроцессорной техники и лазерной диагностики, материаловедения и химических технологий ряд технических проблем по организации контролируемого периодического детонационного сжигания топлива в камере сгорания, казавшихся ранее непреодолимыми, удалось решить. Исследования стали проводиться во многих исследовательских центрах, связанных с авиационной и двигательной тематикой и работами по детонации. В настоящее время наиболее интенсивно эти работы проводятся в США и Франции.

## Пульсирующий детонационный двигатель

Пульсирующий детонационный двигатель (ПДД) в современном представлении — это труба (или связка труб), оборудованная системой подачи воздуха и топлива. Один конец трубы, называемый тяговой стенкой, закрыт, частично закрыт или периодически закрыт (если схема ПДД предусматривает использование механического клапана). Другой конец трубы оборудован реактивным соплом. По заполнению трубы ТВС (полном или частичном) производится инициирование детонации в смеси с помощью того или иного источника инициирования. В результате по смеси распространяется детонационная волна, которая, сжигая ТВС, создает высокое избыточное давление на тяговой стенке. После выхода детонационной волны в атмосферу через сопло давление в трубе снижается. При снижении давления на тяговой стенке до определенного уровня в трубу подается новая порция ТВС, и процесс повторяется.

Для обеспечения высокой эффективности ПДД необходимо обеспечить высокую частоту генерации детонационных волн (порядка 100 Гц и выше). Наиболее привлекательными являются бесклапанные схемы ПДД. В таких схемах труба (или связка труб)

периодически заполняется ТВС благодаря естественному всасыванию воздуха и топлива в трубу после выхода детонационной волны в атмосферу. В бесклапанной схеме отсутствуют подвижные элементы, что значительно повышает надежность и долговечность конструкции.

На рис. 1, а представлены расчетные термодинамические коэффициенты полезного действия (КПД) идеальных циклов для трех случаев сжигания топлива (стехиометрической этилено-воздушной смеси): кривая 1 — в детонационной волне

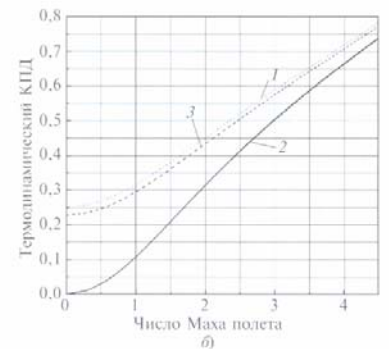
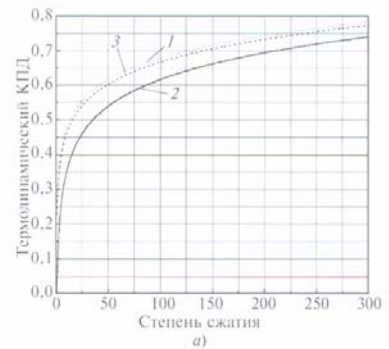


Рис. 1. Термодинамическая эффективность детонационного сжигания топлива (кривые 1) в двигательной установке ЛА в сравнении с дефлаграционным сжиганием топлива при  $p = \text{const}$  (кривые 2) и  $V = \text{const}$  (кривые 3): а — зависимость КПД циклов от степени сжатия потока; б — зависимость КПД циклов от скорости полета ЛА с проточным бескомпрессорным двигателем

(цикл ПДД); 2 —  $p = \text{const}$  (цикл Брайтона); 3 —  $V = \text{const}$  (цикл Хампри). КПД определен как  $(H - H_0)/Q$ , где  $H$  — энтальпия продуктов горения после расширения до начального давления;  $H_0$  — энтальпия исходной смеси;  $Q$  — тепловой эффект реакции горения в расчете на моль смеси. Использовали следующие значения определяющих параметров:  $Q = 22\,000$  кал/моль; показатель адиабаты и изобарная теплоемкость смеси при начальных условиях (300К, 1 атм) 1,394 и 7,0 кал/моль·К, показатель адиабаты и изобарная теплоемкость продуктов горения 1,217 и 11,1 кал/моль·К, соответственно.

На рис. 1, а видно, что КПД цикла с детонационным сжиганием топлива значительно выше КПД цикла Брайтона (используемого в современных реактивных двигателях ЛА), особенно при низких степенях сжатия. Такое повышение КПД, если оно технически достижимо, привело бы к значительному повышению экономичности двигателя. Особенно наглядны преимущества детонационного сжигания топлива применительно к бескомпрессорным прямоточным двигателям (ПВРД). На рис. 1, б проведено сравнение расчетных КПД идеальных циклов в зависимости от скорости полета ЛА с ПВРД и показано, что при дозвуковых и сверхзвуковых (с числом Маха до 2...3) скоростях полета КПД детонационного цикла значительно превышает КПД цикла Брайтона.

Приведенные расчеты не учитывают многие особенности реальных процессов торможения воздуха во входном устройстве, сжигания топлива и расширения продуктов горения в сопле при циклической работе ПДД. Более точные термодинамические расчеты, учитывающие диссоциацию продуктов горения, показывают, что с энергетической точки зрения детонационное горение всегда эффективнее, чем горение при  $p = \text{const}$  и  $V = \text{const}$ . Например, термодинамический расчет для стехиометрической этилено-воздушной смеси при степени сжатия потока 10 дает следующие результаты в приближении равновесного состава продуктов горения при расширении: 0,365 в цикле  $p = \text{const}$ ; 0,485 в цикле  $V = \text{const}$  и 0,502 в цикле ПДД. Для сравнения приведем расчетные КПД указанных циклов в приложении постоянной теплоемкости (см. рис. 1, а): 0,347; 0,458 и 0,475, соответственно. Вследствие того, что в детонационной волне сгорание вещества происходит

при давлении, существенно превышающем начальное, конструкция агрегата упрощается, так как для получения приемлемых КПД нет необходимости в дополнительном механическом сжатии горючей смеси или воздуха как в турбореактивном двигателе.

Расчеты тяговых характеристик идеального ПДД основаны на следующих упрощениях: топливо и окислитель идеально перемешаны; начальные условия в камере сгорания одинаковы для всех циклов; детонация инициируется локально и мгновенно; детонационная волна имеет структуру и параметры классической детонации Чепмена-Жуге (Ч-Ж); коэффициент восстановления давления во входном устройстве равен 1; в реактивном сопле происходит полное расширение продуктов детонации.

Расчетная динамика изменения давления на тяговой стенке в единичном цикле идеального ПДД, работающего на стехиометрической водородо-воздушной смеси, показана на рис. 2, а [4]. Расчетные значения приведенного импульса в единичном цикле идеального ПДД, работающего на различных стехиометрических горючих смесях, показаны на рис. 2, б [5].

Приведенный импульс (на единицу площади поверхности тяговой стенки) определен по формуле

$$I = \int_0^t [P(\tau) - P_0] dt,$$

где  $P_0$  — атмосферное давление;  $P$  — давление на тяговой стенке;  $t$  — время.

По оси абсцисс на рис. 2, б отложен параметр  $(P_3 - P_0)M_{CJ}$ , где

$$P_3 = P_{CJ} \left( 1 - \frac{\gamma_{CJ} - 1}{2} M_{CJ}^2 \right)^{\frac{2\gamma_{CJ}}{\gamma_{CJ} - 1}};$$

$t_{CJ} = L/D_{CJ}$ ;  $P_{CJ}$  и  $\gamma_{CJ}$  — давление и показатель адиабаты продуктов детонации Ч-Ж;  $M_{CJ}$  — число Маха продуктов детонации в состоянии Ч-Ж относительно стенок ПДД;  $L$  — длина камеры сгорания ПДД;  $D_{CJ}$  — скорость детонации Ч-Ж. Давление  $P_3$  приблизительно соответствует давлению в заторможенных продуктах детонации на тяговой стенке ("плато" на рис. 2, а). В соответствии с рис. 2, б приведенный импульс, создаваемый идеальным ПДД за один цикл, можно оценить, зная термодинамические параметры детонации Ч-Ж той или

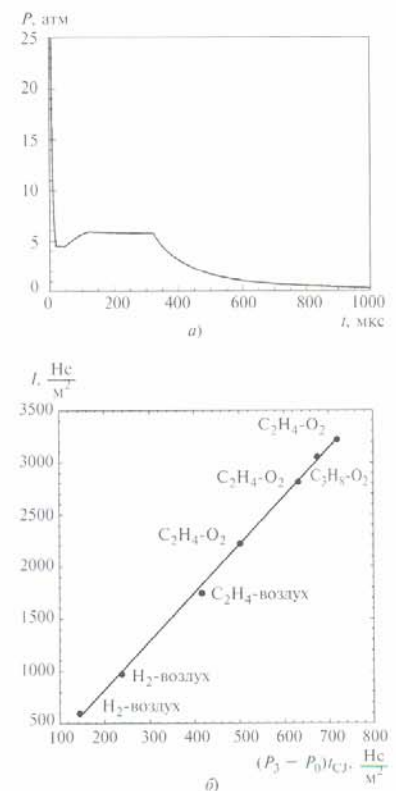


Рис. 2. а — расчетная динамика изменения на тяговой стенке идеального ПДД [4]. Начальный пик давления соответствует инициированию детонации. Постоянное давление на стенке держится до тех пор, пока волна разрежения, возникшая на срезе сопла после выхода детонационной волны в атмосферу, не достигнет тяговой стенки; б — приведенный импульс идеального ПДД, работающего на различных горючих смесях. Точки получены в результате численного решения нестационарной одномерной задачи [5]. Аппроксимация прямой:  $I = 4,65(P_3 - P_0)M_{CJ}$ . Несколько точек для одинаковых смесей соответствуют разным длинам камеры сгорания ПДД

иной горючей смеси ( $D_{CJ}$ ,  $P_{CJ}$ ,  $\gamma_{CJ}$  и  $M_{CJ}$ ) и длину камеры сгорания  $L$ . Зная  $I$  и  $L$ , можно определить удельный импульс на единицу массы топлива  $I_f = I/(L\rho_f g)$ , где  $\rho_f$  — плотность топлива;  $g$  — ускорение силы тяжести.

По данным разных авторов, для стехиометрической водородно-воздушной смеси удельный импульс в единичном цикле превышает 4000 с. Удельный импульс при работе ПДД в частотном режиме зависит от частоты генерации детонационных волн. Наиболее детальные многомерные расчеты показывают, что при работе ПДД на стехиометрической водородо-воздушной смеси с частотой 333 Гц в условиях полета с числом Маха 2,1

на высоте 9,3 км достигается удельный импульс 3130 с [6].

### Перспективы применения ПДД

Простота конструкции и принципа работы ПДД, а также высокая потенциальная термодинамическая эффективность рабочего цикла делают его очень привлекательным для приложений, особенно в авиации и ракетной технике. В авиации наиболее перспективным считают использование ПДД для форсирования тяги: предлагают заменить существующие форсажные камеры в турбореактивных двигателях ЛА на трубчато-кольцевые камеры ПДД [7]. Ввиду того, что на форсажных режимах потребление топлива значительно возрастает, использование эффективных ПДД позволит существенно расширить маневренные показатели и увеличить дальность полета ЛА. Также изучают возможности использования ПДД в основной силовой установке ЛА [8] и рассматривают схемы с комбинированными силовыми установками [8, 9]. В ракетной технике основное внимание уделяют возможности замены дорогостоящих малогабаритных газотурбинных двигателей на воздушно-реактивные ПДД. Разрабатывают схемы ПДД для ракет-носителей [9].

Вследствие жестких весовых и габаритных ограничений, а также требований экономичности, устойчивости и долговечности, свойственных силовым установкам ЛА, кроме требований высоких характеристик, к ПДД предъявляют целый ряд других требований. В соответствии с ними одна из наиболее приемлемых конфигураций ПДД — связка труб длиной 1...2 м, диаметром 70...100 мм с единым воздухозаборником и общим соплом.

Что касается энергетических приложений, известна разработка фирмы "Адройт Системс" (США) [10] — энергетическая установка (ЭУ), работающая на циклическом детонационном сжигании природного газа. В разработке предусмотрено использование специального устройства (преддетонатора) или организация перехода горения в детонацию (ПГД) для получения детонационной волны в камере сгорания ЭУ). Для использования преддетонатора требуются дополнительный окислитель (например, кислород) и/или топливо (например, водород), или сенсibilизатор, повышающий детонационную способность смеси. Для организации ПГД требуются большие длины камеры

сгорания (больше 100 диаметров в случае гладкой трубы) или размещение препятствий внутри камеры, которые сокращают в несколько раз необходимую длину камеры, но значительно увеличивают потери кинетической энергии. Кроме того, возрастает продолжительность заполнения камеры смесью, что приводит к низкой частоте работы ЭУ и необходимости использования большого числа камер сгорания. Тем не менее ввиду того, что для стационарных ЭУ ограничения по весу, геометрическим размерам и рабочей частоте не являются определяющими, успех на пути создания такой установки следует рассматривать как технологический прорыв.

Подобные ЭУ в настоящее время отсутствуют, хотя имеются фундаментальные обоснования возможности их реализации. По сравнению с существующими аналогами (ЭУ на основе поршневых двигателей, газовых или паровых турбин) такая установка отличается повышенным термодинамическим КПД, простотой конструкции и масштабирования, т. е. перехода от модели к полноразмерным агрегатам промышленного масштаба. Наилучшее предназначение таких ЭУ — покрытие пиковых нагрузок в электроэнергетических сетях. Такие разработки могут использоваться и для создания автономных источников энергии для целого ряда приложений (например, судовых ЭУ, автономных электростанций и т. д.). Установки с пульсирующим детонационным сжиганием топлива можно использовать и в качестве горелочных устройств, эффективность которых может превышать эффективность существующих горелок, главным образом благодаря пульсирующему высокоскоростному потоку горячих продуктов детонации, обеспечивающему высокую теплопередачу.

### Проблемы применения ПДД

Несмотря на значительные успехи, достигнутые за последние годы в исследовательских и опытно-конструкторских работах по созданию ПДД, пока нет достоверных сведений об их полетных испытаниях. Созданы лабораторные образцы ПДД, работающие на газовом (водород, этилен, пропан) и жидком (*n*-гексан, бензин, частично испаренный керосин) топливе и воздухе с частотой от 1 до 90 Гц [11–13]. На стендах измерены тяговые характеристики таких двигателей. Однако в литературе отмечаются мно-

гочисленные отклонения от идеальной схемы ПДД, связанные с несовершенным смешением компонентов ТВС; неравномерным заполнением камеры сгорания свежей ТВС; конечными значениями длины и времени развития детонационной волны и ее неустановившимся характером распространения; несоответствием параметров детонации параметрам детонации Ч-Ж и другими факторами.

В практических ПДД желательно использовать штатные жидкие топлива (типа авиационного керосина) без активных добавок с непосредственной подачей в камеру сгорания без предварительного смешения с воздухом. В настоящее время именно эти факторы оказались основным барьером на пути создания ПДД, конкурирующего с существующими силовыми установками. Необходимость использования жидкого углеводородного топлива типа керосина в рабочем цикле воздушно-реактивного ПДД порождает ряд фундаментальных проблем, связанных с низкой детонационной способностью таких топлив и необходимостью больших энергетических затрат на инициирование детонации [14].

Традиционные для других типов силовых установок проблемы смешения топливных струй с воздухом в случае ПДД осложняются импульсным характером течения в камере и чрезвычайно малым временем, располагаемым для заполнения камеры. В основном, предлагаются схемы ПДД с предварительным испарением топлива. Однако такие схемы считают непрактичными вследствие взрывоопасности испарителей. Предлагаются подходы, связанные с предварительной подготовкой (обработкой) топлива (пиролизом и т. д.), направленной на повышение его детонационной способности [15].

Рассматриваются схемы на двух топливах с существенно различной детонационной способностью [16]. Изучаются способы инициирования детонации с помощью энергетически слабых источников зажигания, например, контролируемый переход горения в детонацию в канале с препятствиями [17, 18], перепуск детонационной волны из трубок с чувствительной смесью в рабочий объем [11, 19], кумуляция ударных волн от кольцевого разряда [20] или сверхзвуковых струй [21], разгон инициирующей ударной волны последовательными электрическими разрядами [22] и др.

Продолжаются исследования по интенсификации смешения жидкого топлива с воздухом — важнейшего фактора, предопределяющего возможность инициирования детонации. Большое внимание уделяют вопросам оптимизации характеристики работы ПДД на переходных режимах работы, а также активному управлению рабочим процессом (управление полнотой заполнения камеры сгорания, однородностью заполнения, полнотой сгорания топлива, чистотой выхлопа, тепловым режимом стенок камеры сгорания, шумом и т. д.).

#### Заключение

Проведен сравнительный анализ термодинамических циклов энергетических установок, работающих на дефлаграционном ( $p = \text{const}$  и  $V = \text{const}$ ) и детонационном сжигании топлива. Показано, что термодинамическая эффективность "детонационного" цикла превышает эффективность "дефлаграционных" циклов. Один из перспективных способов реализации "детонационного" цикла в энергетических установках — сжигание топлива в периодически генерируемых проходящих детонационных волнах. Описаны схемы организации рабочего процесса в ПДД. Представлены результаты исследований, отражающие современное состояние вопроса. Сформулированы ключевые проблемы, возникающие на пути создания ПДД.

#### Список литературы

1. Зельдович Я. Б. // Журнал технической физики. 1940. т. 10. № 17. С. 1453—1461.
2. Hoffamn H. Reaction propilsion by intermittennt detonative combustion. Minary of Supple. Volkenrode Translation. 1940.
3. Desbordes D., Daniecu E., Zitoun R. High-Speed Deflagration and Detonation. Fundamentals and Control. (G. Roy, S. Frolov, D. Netzer, A. Borisov, Eds.) Voscow: Elex-KM Publ., 2001. P. 177—192.
4. Kailasanath K. Ibid. P. 193—206.
5. Kailasanath K. Advances in Confined Datonations (G. Roy, S. Frolov, R. Santoro, S. Tsyganov, Eds.) Voscow: Torus Press, 2002. P. 207—212.
6. Ma F., Choi J.-Y., Wu Y., Yang V. Ibid. P. 231—234.
7. Furlong E. R., Leyva I. A., Sander-son S. R. Control of Detonation Processes (G. Roy, S. Frolov, D. Netzer, A. Borisov, Eds.) Moscow: Elex-KM Publ., 2000. P. 219—221.
8. Fernandez R., Slater J. W., Paxson D. E. Confined Detonations and Pulse Detonation Enhines (G. Roy, S. Frolov, R. Satoro, S. Tsyganov, Eds.) Moscow: Torus Press, 2003. P. 304—328.

9. Perkins H. D. Proc. 14<sup>th</sup> ONR Propulsiom Meeting (G. Roy, F. Mashayek, Eds.) Chicago, 2001, P. 239—243.

10. US Patent N 6,062,018. Bussing T. Date of Patent: 16.05.2000.

11. Brophy C. M., Netzer D. W., Sini-baldi J., Johnson R. High-Speed Deflagration and Detonation. Fundamentals and Control (G. Roy, S. Frolov, D. Netzer, A. Borisov, Eds.) Moscow: Elex-KM Publ., 2001. P. 207—222.

12. Baklanov D. I., Gvozdeva L. G., Scherbak N. B. Ibid. P. 239—250.

13. Shauer F., Stutrud J., Bradley R., V. Katta, Hoke J. Confined Detonations and Pulse Detonatiom Engines (G. Roy, S. Frolov, R. Santoro, S. Rsyganov, Eds.) Moscow: Torus Press, 2003. P. 275—289.

14. Borisov A. A. Gaseous and Heterogeneous Detonations. Science to Applications (G. Roy, S. Frolov, K. Kailasanath, N. Smirnov, Eds.) Moscow: ENAS Publ., 1999. P. 3—24.

15. Levin V. A., Nechaev J. N., Tara-sov A. I. High-Speed Deflagration and De-tonation. Fundamentals and Control (G. Roy, S. Frolov, D. Netzer, A. Borisov, Eds.) Moscow: Elex-KM Publ., 2001. P. 223—238.

16. Frolov S. M., Basevich V. Ya., Vas-il'ev A. A. Ibid. P. 315—332.

17. Smirnov N. N., Nikitin V. F., Tyur-nikov M. V. et all. Ibid. P. 3—30.

18. Higgins A. J., Pinard P., Yoshinaka A. C., Lee J. H. S. Ibid. P. 45—62.

19. Murray S. B., Thibault P. A., Zhang F., Bjerketvedt D. et all. Ibid. P. 139—162.

20. Korobeinikov V. P., Markov V. V., Semenov I. V., Pedrow P. D. et all. Ibid. P. 289—302.

21. Ahasov O. V., Penyazkov O. Ibid. P. 31—44.

22. Frolov S. M., Basevich V. Ya., Akse-nov V. S., Polikhov S. A. Advances in Con-fined Detonations (G. Roy, S. Frolov, R. Santoro, S. Tsyganov, Eds.) Moscow: Torus Press, 2002. P. 150—157.

24-27  
НОЯБРЬ / NOVEMBER

WELDEX  
WELDEX  
WELDEX


ОРГАНИЗАТОРЫ

ПРИ СОДЕЙСТВИИ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПОНСОРЫ

МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ  
ВЫСТАВКА РОССВАРКА — ГЛАВНОЕ СОБЫТИЕ  
СВАРОЧНОЙ ОТРАСЛИ

МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ: РОССИЯ, ИРКУТСК, КВЦ «ФОРМАЛИКСИ»



# рос сварка

3-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ  
ВЫСТАВКА СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ,  
ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ

**ПРОФИЛЬ ВЫСТАВКИ**

- Оборудование и технологии для электродуговой сварки металлов (ручная, полуавтоматическая, автоматическая, роботизированная)
- Оборудование и технологии для плазменной, лазерной, газоплазменной сварки, резки, наплавки (ручной, механизированной, роботизированной)
- Оборудование и технологии для сварки композиционных (композитной) сварки
- Оборудование и технологии для сварки пластмасс
- Оборудование, материалы и технологии контроля качества сварных соединений и исходных материалов
- Оборудование и технологии производства сварочных материалов
- Оборудование и технологии для заливки
- Оборудование для термической обработки материалов и сварных конструкций
- Материалы для сварки, резки, наплавки, напыления, литья (электроды, проволока, прутки и т.п.)
- Средства и методы защиты от вредных производственных факторов (рабочая одежда, системы вентиляции, респираторы и т.п.)
- Инструменты и приспособления для сварки
- Электронная элементная база и комплектующие для производства сварочного оборудования
- Методы обучения и повышения квалификации сварочного персонала
- Научные разработки и новинки
- Рыночные сварочное оборудование
- Салон поддержанного и восстановленного сварочного оборудования

**ПРИ ПОДДЕРЖКЕ**

МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ,  
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ РФ  
ДЕПАРТАМЕНТЫ НАУКИ И  
ПРОМЫШЛЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ  
ПРАВИТЕЛЬСТВА ИРКУТСКОЙ  
ОБЛАСТИ  
ИРКУТСКОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ  
АССОЦИАЦИИ ГЛАВНЫХ СВАРОЧНИКОВ

**КОНТАКТЫ**

МЕЖДУНАРОДНАЯ  
ВЫСТАВочНАЯ  
КОМПАНИЯ  
Тел: 1099 109 34-86  
Тел./факс: (099) 348-99-04  
E-mail: kama@yandex.ru

WWW.ROSSVARKAEXPO.RU