

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

УДК 621.791.927.55

ЕРОХИН МИХАИЛ НИКИТЬЕВИЧ, докт. техн. наук, академик РАН, профессор¹

E-mail: Er.mihn@mail.ru

ПЛЕТНЁВ ЛЕОНИД ВЛАДИМИРОВИЧ, докт. физ.-мат. наук, профессор²

E-mail: pletnevl@yandex.ru

ЧУПЯТОВ НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент²

E-mail: nikolaj-ch@mail.ru

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127550, Российская Федерация

² Тверской государственный технический университет, набережная Афанасия Никитина, 22, г. Тверь, 170026, Российская Федерация

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ФОРМИРОВАНИЯ CVD-ПОКРЫТИЙ НА ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКИ

Основной задачей работы является разработка методики обеспечения равномерности роста покрытий, получаемых химическим осаждением из паровой фазы (CVD – Chemical Vapor Deposition). С целью обеспечения указанной равномерности выявлены основные критерии, влияющие на распределение покрытия по подложке. К ним относятся геометрические параметры системы для нанесения покрытий, относительное расположение её элементов и масса молекул применяемого реагента – МОС (металлоорганического соединения). Разработана оригинальная методика математической оптимизации параметров системы и относительное расположение её элементов по заданным геометрическим размерам упрочняемой детали и применяемому реагенту. Разработана программа, позволяющая задавать геометрические размеры подложки и массу молекул реагента и получать на выходе оптимальные параметры системы, обеспечивающие равномерность распределения покрытия по подложке. В статье представлены также результаты тестирования разработанной методики на примере моделирования и оптимизации системы для процесса получения карбидохромового покрытия (разложением гексакарбонила хрома) на наружной поверхности цилиндрической детали с общей длиной 200 мм и диаметром 25 мм. Экспериментально подтверждены результаты, полученные при математическом моделировании. Установлено, что равномерность распределения карбидохромового покрытия по подложке обеспечена при симметричном расположении детали относительно источника карбонила с минимальным расстоянием между ними в 0,15 м; при условии обеспечения расстояния между деталью и источником гексакарбонила хрома более 0,15 м. Установлено также, что размеры реакционной камеры не оказывают существенного влияния на распределение покрытия по подложке. Полученные в работе результаты позволили с минимальными затратами адаптировать систему для нанесения любых CVD-покрытий на цилиндрические подложки с различными геометрическими размерами и дали возможность минимизировать или даже исключить из технологических процессов восстановления и упрочнения прецизионных деталей операции финишной механической обработки.

Ключевые слова: методика, CVD-метод, карбидохромовые покрытия, гексакарбонил хрома, карбид хрома, цилиндрическая подложка.

Введение. Наиболее перспективным способом в области получения покрытий на подложках сложной формы является CVD-метод металлоорганических соединений (МОС), который основан на способности определённых веществ выделять металлы

или их соединения под воздействием того или иного вида энергии.

Сущность данного процесса заключается в следующем: исходное МОС, находящееся в жидком или твердом состоянии, переводится в газообраз-

ное состояние путем испарения или возгонки, полученная газовая смесь подается в реакционную камеру, где при контакте с подложкой, нагретой до температуры разложения МОС, диссоциирует с образованием плотного покрытия [1–3].

В работах [4–6] выполнен анализ способов модифицирования поверхностей трения и установлено, что для восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственной техники целесообразно использовать CVD-покрытия, однако широкое использование данного процесса для восстановления и упрочнения прецизионных деталей сдерживается отсутствием универсальной методики обеспечения равномерного роста покрытия по всей поверхности.

Обеспечение равной толщины покрытия в каждой из точек упрочнённой поверхности позволит свести к минимуму или исключить из технологических процессов операцию финишной механической обработки, оптимизировать расход МОС, а также получить максимальную прочность сцепления покрытия с основой за счёт обеспечения равномерности распределения напряжений в покрытии.

Максимальную эффективность, в области обеспечения равномерного формирования покрытий на широкой номенклатуре деталей может дать создание математической модели взаимодействия молекул реагента и элементов системы с последующей оптимизацией параметров системы и относительного расположения её элементов [7]. Созданная модель процесса позволит с минимальными затратами адаптировать параметры системы для нанесения любых CVD-покрытий на детали с различными геометрическими размерами.

Цель работы – создание компьютерной программы, которая позволит, задавая геометрические размеры подложки и массу молекул реагента, получать на выходе оптимальные параметры системы, обеспечивающие равномерность распределения покрытия по подложке.

Методика исследований. Для моделирования процесса нанесения покрытий термическим разложением МОС в CVD-процессе принимаем следующие условия: считаем, что движение молекул в реакционной камере происходит в свободномолекулярном режиме, а состояние газовой фазы в камере считаем равновесным. В этом случае траектории движения молекул будут представлять отрезки прямых от источника к детали, от источника к стенке камеры, от стенки камеры к детали или от стенки к стенке. Перемещение молекулы в объёме камеры заканчивается её попаданием на деталь, где она адсорбируется и диссоциирует. Режим движения молекулы в камере определяется числом Кнудсена Kn : отношением длины свободного пробега молекулы λ к характерному размеру реакционной камеры D (рис. 1). При этом молекулы МОС, вылетая из источника в основании камеры, могут попасть на деталь или стенку камеры. При вылете из источника для молекулы разыгрываются координаты точки вылета из источника $(x_0; y_0; z_0)$ и компоненты скорости $(v_x; v_y; v_z)$. Необходимо отметить, что компонен-

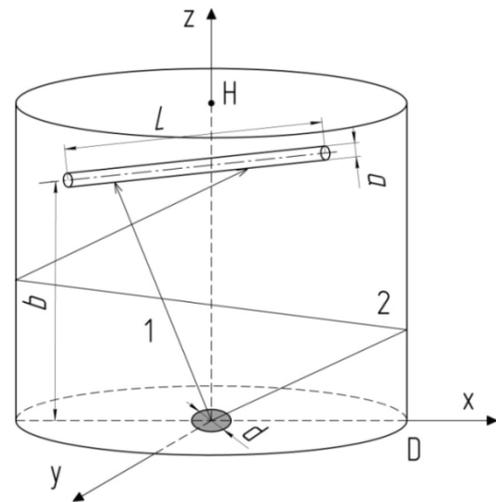


Рис. 1. Схема расположения детали в реакционной камере: H – высота реактора; D – диаметр реактора; d – диаметр источника; b – расстояние от источника до центра детали; a – диаметр детали; L – длина детали

ты скоростей разыгрываются по нормальному закону распределения при температуре T испарения или возгонки МОС. Компонента скорости, перпендикулярная стенке, разыгрывается на основании закона «косинуса», т.е. средние скорости этих компонент превышают средние скорости двух других компонент [8–10]. Из системы уравнений прямолинейного движения молекул в установке

$$Kn = \frac{\lambda}{d}. \quad (1)$$

$$\begin{cases} x = v_x t + x_0 \\ y = v_y t + y_0, \\ z = v_z t + z_0 \end{cases} \quad (2)$$

можно найти положение молекулы в установке в любой момент времени t . При этом основание системы (дно камеры) задаётся уравнением плоскости

$$z = 0. \quad (3)$$

Крышка камеры задаётся уравнением

$$z = H. \quad (4)$$

Боковая цилиндрическая поверхность (для области $0 < z < H$) задаётся уравнением

$$x^2 + y^2 = R^2. \quad (5)$$

После вылета молекулы из источника определяется возможность ее попадания на деталь. Если это происходит, то молекула считается адсорбированной, и начинается розыгрыш следующей молекулы. Если молекула не попадала на деталь, то определяется место её попадания на стенку реакционной

камеры и разыгрываются новые компоненты её скорости и положений. В каждой модели разыгрывается $N = 50000$ молекул МОС.

Для обчёта траектории движения молекул и закона их распределения по поверхности подложки составлена программа, которая позволяет выполнить анализ распределения молекул любого МОС по поверхности цилиндрической подложки с заданными геометрическими параметрами, и даёт возможность оптимизировать систему для получения CVD-покрытий с минимальными отклонениями от заданной толщины.

С целью подтверждения работоспособности предложенной методики выполнена экспериментальная работа. При этом проверялись на практике результаты оптимизации системы для процесса нанесения карбидохромового CVD-покрытия. В качестве подложки выступала цилиндрическая деталь с общей длиной $L = 200$ мм и диаметром $a = 25$ мм. В качестве МОС выбран гексакарбонил хрома ($\text{Cr}(\text{CO})_6$). Нанесение покрытий осуществлялось при оптимальных параметрах системы, установленных математическим моделированием. Данная работа выполнена на базе предприятия ООО «Промсервис» г. Ржев с помощью промышленной универсальной установки для нанесения износостойких покрытий на инструменты и пары трения.

Геометрические параметры имеющейся реакционной камеры: высота реактора $H = 0,8$ м и диаметр реактора $D = 0,6$ м (рис. 1). Моделирование проводилось для различных расстояний (b) горизонтального положения середины цилиндрической детали до источника МОС.

Толщина полученного покрытия в разных точках образца измерялась на поперечных сечениях с применением растрового электронного микроскопа Quanta 3D FEG производства компании FEI.

Результаты исследований. Результатом проведённой работы является оригинальная методика математической оптимизации параметров системы для нанесения CVD-покрытий. Оптимизация производится с помощью разработанной компьютерной программы, которая позволяет, задавая геометрические размеры подложки и массу молекул реагента, получать на выходе оптимальные параметры системы, обеспечивающие равномерность распределения покрытия по подложке для каждого конкретного случая.

В процессе тестирования разработанной методики получен закон распределения молекул $\text{Cr}(\text{CO})_6$

по поверхности детали ($L = 200$ мм, $a = 25$ мм), в зависимости от расстояния b между центром детали и источником МОС (рис. 2). Установлено, что с увеличением расстояния между источником и поверхностью детали число молекул, попадающих сразу на деталь, уменьшается (табл.), а равномерность распределения адсорбированных молекул повышается. Результаты расчетов приведены на рисунке 2.

При расстоянии $b = 0,05$ м распределение молекул, попавших на деталь после вылета из источника и после всех возможных столкновений со стенками реактора, имеет вид нормального распределения. Из-за близкого расположения детали и источника 48,5% молекул попадает сразу на деталь. Именно за счет таких молекул формируется основное распределение. Формирование слоя покрытия происходит неравномерно. Закон распределения молекул по поверхности детали представлен на рисунке 2 (кривые «1»).

С увеличением расстояния от источника до детали распределение адсорбированных молекул сохраняет вид нормального распределения, но дисперсия увеличивается. Молекулы, попавшие на деталь

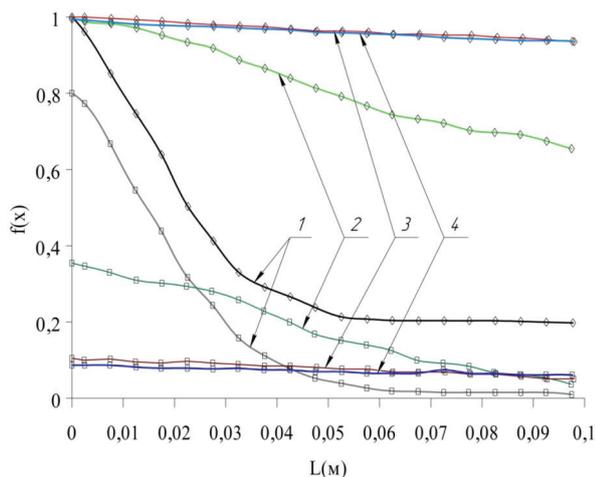


Рис. 2. Распределение молекул $\text{Cr}(\text{CO})_6$ на поверхности детали ($H = 0,8$ м, $R = 0,6$ м):
 □ – распределение молекул $\text{Cr}(\text{CO})_6$, попавших на деталь из источника; ◇ – распределение молекул $\text{Cr}(\text{CO})_6$, попавших на деталь после всех возможных столкновений со стенками установки; 1 – $b = 0,05$ м; 2 – $b = 0,1$ м; 3 – $b = 0,15$ м; 4 – $b = 0,2$ м

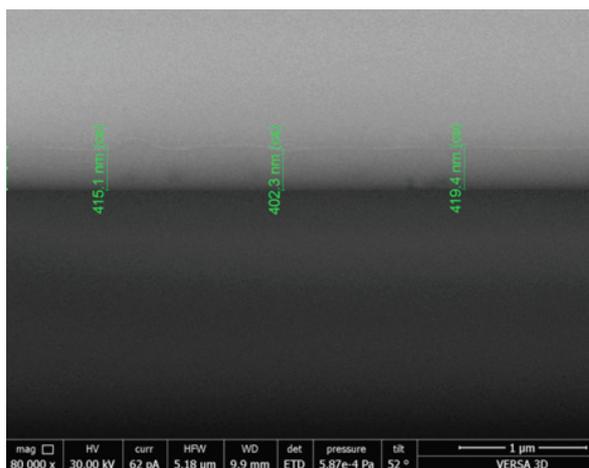
Таблица

Зависимость числа молекул МОС, попадающих после вылета из источника сразу на деталь от расстояния между деталью и источником МОС

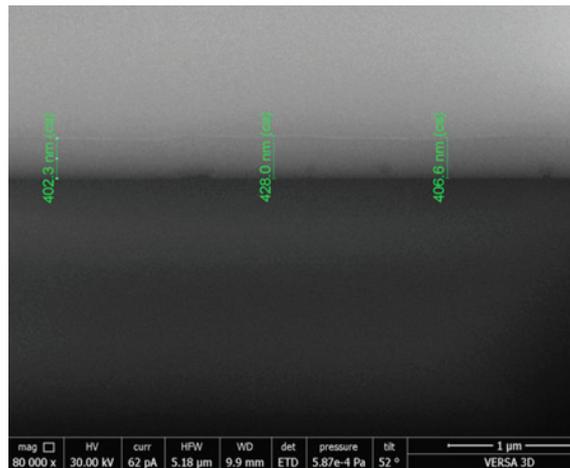
Отношение числа молекул, попавших на деталь без столкновений со стенками, к общему количеству разыгранных молекул	b , м			
	0,05	0,10	0,15	0,20
s	0,485	0,224	0,122	0,780

после вылета из источника, вносят в распределение все меньший вклад. Равномерность формирования слоя покрытия увеличивается. Законы распределения молекул по поверхности детали при $b = 0,1$ м, $b = 0,15$ м и $b = 0,2$ м представлены на рисунке 2 (кривые «2», «3», «4» соответственно). Из результатов видно, что уже при $b = 0,15$ м распределение адсорбированных молекул по детали можно считать равномерным. Дальнейшее увеличение расстояния не приводит к значительным изменениям в распределении.

Практическая работа полностью подтвердила результаты, полученные при моделировании. При горизонтальном расположении цилиндрического образца с диаметром 25 мм и длиной 200 мм (рис. 1) на расстоянии 0,15 м от источника карбонила формирование покрытия происходит равномерно по всей длине. На рисунке 3 представлены результаты измерений толщины карбидохромового покрытия: «а» – толщина на расстоянии 5 мм от края образца, «б» – толщина на расстоянии 100 мм от края образца.



а



б

Рис. 3. Результаты измерения толщины карбидохромового покрытия на образце с диаметром 25 мм и длиной 200 мм: «а» – на расстоянии 5 мм от края образца; «б» – на расстоянии 100 мм от края образца

Выводы

Теоретические и практические исследования, проведённые при изучении процесса нанесения покрытий термическим разложением $\text{Cr}(\text{CO})_6$, показали эффективность разработанной методики обеспечения равномерности роста покрытий на поверхности цилиндрической подложки.

Полученная методика пригодна для повышения равномерности распределения CVD-покрытий на цилиндрических подложках с любыми геометрическими размерами. При этом наибольший технический эффект может быть достигнут при использовании оптимизации на начальных этапах разработки CVD-процессов (до стадии подбора технологического оборудования).

Библиографический список

1. Hugh O. Pierson. Handbook of Chemical Vapor Deposition, 1999.
2. Козырев В.В. Металлоорганические соединения в машиностроении и ремонтном производстве: Монография. Тверь: Издательство Студия-С, 2003. 160 с.
3. Сыркин В.Г. Газофазная металлизация через карбонилы. М.: Металлургия, 1985. 248 с.

4. Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Чупятов Н.Н. Применение карбонильного хрома для получения упрочняющих покрытий на деталях сельскохозяйственной техники // Материалы Международной научно-практической конференции «Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК». Минск: БГАТУ, 2014. Ч. 1. С. 275–278.

5. Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Чупятов Н.Н. Способы модифицирования поверхностей трения деталей машин: Монография. М.: ФГБОУ ВПО МГАУ, 2014. 140 с.

6. Сыркин В.Г. CVD-метод. Химическая парофазная металлизация. М.: Наука, 2000. 496 с.

7. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. 2-е изд., испр. М.: Физматлит, 2001.

8. Берд Г. Молекулярная газовая динамика. М.: Мир, 1981. 319 с.

9. Pletnev L.V. Monte Carlo Simulation of Evaporation Process into the Vacuum // Monte Carlo Methods and Applications. 2000. Vol. 6. No. 3. Pp. 191–203.

10. Уварова Л.А., Плетнев Л.В. Моделирование переноса частиц в цилиндрических системах // Вестник «СТАНКИН». 2011. № 4 (16). С. 63–65.

Статья поступила 08.07.2016

DEVELOPING METHODS OF CONTROLLING FORMATION OF CVD-COATINGS ON CYLINDRICAL SUBSTRATE OUTER SURFACE

MIKHAIL N. EROKHIN, DSc (Eng), Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor¹

E-mail: Er.mihn@mail.ru

LEONID V. PLETNEV, DSc (Phys-Math), Professor²

E-mail: pletnevl@yandex.ru

NIKOLAI N. CHUPYATOV, PhD (Eng), Associate Professor²

E-mail: nikolaj-ch@mail.ru

¹Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Timiryazevskaya str., 49, Moscow, 127550, Russian Federation

²Tver State Technical University, Afanasiy Nikitin emb., 22, Tver, 170026, Russian Federation

The main objective of the work is to develop a methodology to ensure the uniformity of coating growth produced by chemical vapor deposition (CVD). In order to ensure the considered uniformity, the authors have identified the main criteria affecting the coating distribution over the substrate. These include the geometric parameters suitable of the system to be coated, the relative positions of its elements and the mass of organometallic compound molecules. The authors have developed an original technique of mathematical optimization of the system parameters and the relative location of its elements with accounts of given geometrical dimensions of the components to be hardened and reagents used. They have also elaborated a program to determine the substrate geometric dimensions and the mass of reactant molecules and obtain the system's best output parameters to ensure uniform distribution of coating on the substrate. The paper presents the technique testing results exemplified by the system modeling and optimizing for the process of obtaining chromium carbide coating (with chromium hexacarbonyl decomposition) on the outer surface of a cylindrical part with a total length of 200 mm and a diameter of 25 mm. The results obtained by mathematical modeling have been experimentally confirmed. It has been found that the uniformity of chromium carbide coating on the substrate is ensured with a symmetrical arrangement of parts relating to the carbonyl source with a minimum spacing between them of 0.15 m; provided that the distance between the workpiece and the source of chromium hexacarbonyl is over 0.15 m. It has also been found that the size of the reaction chamber does not make a significant impact on the coating distribution over the substrate. The results obtained have allowed to adapt the system for making any CVD-coatings on the cylindrical substrate of different dimensions at a minimal cost as well as to minimize or even eliminate finish machining operations from the restoration and strengthening processes of precision parts.

Key words: technique, CVD-method, chromium carbide coating, chromium hexacarbonyl, chromium carbide, cylindrical substrate.

References

1. Hugh O. Pierson. Handbook of Chemical Vapor Deposition, 1999.
2. Kozyrev V.V. Metalloorganicheskie soedineniya v mashinostroenii i remontnom proizvodstve: Monografiya. [Organometallic compounds in engineering and repair production: Monograph]. Tver: Publisher Studio C, 2003. 160 p.
3. Syrkin V.G. Gazofaznaya metallizatsiya cherez karbonily. [Gas-phase metallization through carbonyls]. M.: Metallurgiya, 1985. 248 p.
4. Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Chupyatov N.N. Primenenie karbonil'nogo khroma dlya polucheniya uprochnyayushchikh pokrytiy na detalyakh sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [The use of chromium carbonyl for hardening coatings on farm machinery parts] // Proceedings of the International scientific-practical conference "Modern problems of development of new techniques, technologies, and the organization of technical service in agribusiness". Minsk BSATU, 2014. Part 1. Pp. 275–278.
5. Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Chupyatov N.N. Sposoby modifitsirovaniya poverkhnostey treniya detaley mashin: Monografiya [Methods of modifying friction surfaces of machinery parts: Monograph]. M.: FSBEI HPE MSAU, 2014. 140 p.
6. Syrkin V.G. CVD-metod. Khimicheskaya parofaznaya metallizatsiya. [CVD-method. Chemical vapor metallization]. M.: Nauka, 2000. 496 p.

7. Samarsky A.A., Mikhailov A.P. Matematicheskoe modelirovanie. Idei. Metody. Primery. 2-e izd., ispr. [Math modeling. Ideas. Methods. Examples. 2nd ed., rev.] M.: FIZMATLIT 2001.

8. Berd G. Molekulyarnaya gazovaya dinamika [Molecular gas dynamics]. M.: Mir, 1981. 319 p.

9. Pletnev L.V. Monte Carlo Simulation of Evaporation Process into the Vacuum // Monte Carlo

Methods and Applications. 2000. Vol. 6. Issue 3. Pp. 191–203.

10. Uvarova L.A., Pletnev L.V. Modelirovanie perenosa chastits v tsilindricheskikh sistemakh [Modeling of particle transferring in cylindrical systems] // Herald of "STANKIN". 2011. Issue 4 (16). Pp. 63–65.

Received on July 8, 2016

УДК 631.354

ДИДМАНИДЗЕ ОТАРИ НАЗИРОВИЧ, докт. техн. наук, член-корреспондент РАН, профессор¹

E-mail: a.kareff2012@yandex.ru

ВАРНАКОВ ДМИТРИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ, докт. техн. наук, доцент²

E-mail: varndm@mail.ru

ВАРНАКОВ ВАЛЕРИЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ, докт. техн. наук, профессор²

E-mail: varnval@mail.ru

КАРЕВ АЛЕКСЕЙ МИХАЙЛОВИЧ, канд. техн. наук, доцент¹

E-mail: a.kareff2012@yandex.ru

ВАРНАКОВА ЕКАТЕРИНА АЛЕКСЕЕВНА, мл. научный сотрудник²

E-mail: varndm@mail.ru

ПЛАТОНОВ АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ

E-mail: varnval@mail.ru

¹Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127550, Российская Федерация

²Ульяновский государственный университет, ул. Льва Толстого, 42, Ульяновск, 432017, Российская Федерация

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО СООТНОШЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ БИОДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ПРИ УСЛОВИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВОЙСТВ И ЦЕТАНОВОГО ЧИСЛА

В статье рассмотрены вопросы использования биодизельного топлива как альтернативного топлива для автомобилей. В экономически развитых странах существуют программы по развитию энергетики, основанной на возобновляемых источниках энергии, что свидетельствует об актуальности данного направления исследований. Однако снижение цетанового числа и ухудшение низкотемпературных свойств ограничивают применение биотоплива. Разработаны способы оценки оптимального соотношения компонентов биодизельного топлива. На основании предложенных способов произведена оценка оптимального соотношения компонентов биодизельного топлива с учетом изменения его цетанового числа и низкотемпературных свойств. Для этого был применен анализатор низкотемпературных свойств нефтепродуктов и пробы биодизельного топлива с различным соотношением компонентов. Представлены низкотемпературные свойства биодизельного топлива в зависимости от температуры и процентного содержания рапсового масла, определено и обосновано оптимальное соотношение. Определено оптимальное соотношение дизельного топлива и рапсового масла при обеспечении требований стандарта по метановому числу. С этой целью