

## К ОБОСНОВАНИЮ КРИТЕРИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ МОТОРНЫХ МАСЕЛ

**А.А. Глущенко**, к. т. н., доцент, Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия. Тел.: 89374564933. e-mail: [oildel@yandex.ru](mailto:oildel@yandex.ru)

**Р.А. Зейнетдинов** к. т.н., доцент, Санкт-Петербургский аграрный университет. e-mail: [zra61@mail.ru](mailto:zra61@mail.ru)

**Ключевые слова:** *Отработанные моторные масла, регенерация масел, эксергия, термоэкономический анализ.*

*Рассмотрены возможности повышения экономической эффективности регенерационных установок по регенерации моторных масел использованием ее внутренних энергетических ресурсов. Предложена оценка схем энерготехнологических процессов регенерации моторных масел применением эксергетического метода.*

В процессе эксплуатации в двигателе свойства моторных масел изменяются. Основные причины ухудшения качества смазочных масел – окисление; термическое разложение; механическое загрязнение; обводнение и разжижение топливом [1, 2, 3]. В большинстве случаев эти изменения не исключают возможности повторного использования масел после соответствующей обработки и восстановления их физико-химических свойств [4].

При решении проблемы рационального использования отработанных моторных масел (ММО) существуют два пути: сжигание его в топках котельных и повторное использование после очистки и дополнительной обработки. В условиях непрерывного роста цен на нефтепродукты и повышения экологических требований к отработанным моторным маслам второе направление приобретает более актуальный характер. Использование регенерированных масел даёт большой экономический эффект, обеспечивает экономию нефтепродуктов, уменьшает количество отходов, загрязняющих окружающую среду.

В настоящее время для регенерации отработанных масел применяют разнообразные технологии, основанные на физических, химических и физико-химических процессах и заключающиеся в удалении из масла продуктов старения и загрязнений [3,

5]. С помощью физических способов регенерации, не затрагивая химической основы обрабатываемых масел, удаляют механические примеси, воду, асфальто-смолистые соединения, коксообразные вещества. Химические способы регенерации используют для удаления асфальто-смолистых, кислотных, гетероорганических соединений и воды. Физико-химическими способами регенерации удаляются асфальтно-смолистые и кислотные соединения, эмульгированная и растворённая вода. При этом сложность изучения кинетики вышеназванных процессов регенерации ММО с целью определения режима, соответствующего максимальному выходу регенерированного масла с необходимой степенью очистки, связана прежде всего с тем, что ММО являются системой многокомпонентной.

Выбор способа регенерации масел определяется двумя факторами: характером требований, предъявляемых к качеству товарного масла данного назначения; природой и количеством содержащихся в масле загрязнений и продуктов старения.

Анализ литературных источников и результатов исследований [6, 7, 8] показывает, что в настоящее время нет оптимальной методики оценки эффективности выбираемых технологий регенерации ММО. Поскольку современные технологии регенерации ММО предусматривают неоднократное нагрева-

ние и охлаждение регенерируемого продукта, обоснование решения вопросов регенерации теплоты (вторичное энергоиспользование) представляется одним из направлений совершенствования теплотребления и снижения энергоёмкости процесса. При этом регенерация теплоты может осуществляться путём использования физической теплоты отходящих потоков масла для нагрева входящих в этот же аппарат потоков. Это обеспечит экономию тепловой энергии как на стадии предварительного подогрева исходного потока, так и в процессе регенерации.

Практика оптимизации энерготехнологических систем свидетельствует о большой ценности термодинамических методов анализа, позволяющих на основе уравнений термодинамики более простыми и вместе с тем точными способами выявить наиболее выгодные схемы и параметры процесса. Поиск оптимальных вариантов энерготехнологических схем регенерационных установок на основе показателей термодинамической эффективности позволяет в большинстве случаев получить необходимую информацию об их энергетической эффективности. При этом наиболее перспективной основой для проведения такого анализа и оптимизации является эксергетическая концепция, вытекающая из второго начала термодинамики. Эксергетический метод анализа позволяет оценить степень использования энергии, её потери, а также получить распределение этих потерь по отдельным аппаратам системы и выявить наименее эффективные из них [9].

При анализе и оптимизации физико-химических процессов регенерации ММО используют физическую и химическую эксергии вещества, а также энергию теплового потока [10]. Физическая эксергия  $E$  является результатом разницы температуры и давления рассматриваемого вещества (ММО) соответственно от температуры  $T_0$  и давления  $P_0$  окружающей среды. Химическая эксергия  $E_x$  связана с установлением равенства химических потенциалов между соответствующими компонентами рассматриваемого потока и «окружающей среды».

Мольная эксергия потока вещества

$$E_m = H(T, P) - H_0(T_0, P_0) - T_0 [S(T, P) - S_0(T_0, P_0)] - \sum_{i=1}^n x_i (\mu_i - \mu_{i0}), \quad (1)$$

где  $E_m$ ,  $H$ ,  $S$  – соответственно, мольные эксергия, энтальпия и энтропия потока вещества,  $KДж/моль$ ,  $KДж/м^3$ ;  $m_p$ ,  $x_i$  – соответственно, химический потенциал и мольная доля  $i$ -го компонента смеси;  $n$  – число компонентов; индексом “0” помечены параметры, относящиеся к окружающей среде.

Эксергия теплового потока

$$E_q = Q(T - T_0)/T, \quad (2)$$

где  $T$  – температура потока,  $^{\circ}K$ .

При анализе технологических процессов регенерации ММО необходимо учитывать физическую и химическую составляющие эксергии.

Тогда в общем случае приращение мольной эксергии вещества при изменении температуры, давления и состава имеет вид:

$$dE_m = \left( \frac{\partial E_m}{\partial T} \right)_{P, x_1, \dots, x_n} dT + \left( \frac{\partial E_m}{\partial P} \right)_{T, x_1, \dots, x_n} dP + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial E_m}{\partial x_i} \right)_{P, T, x_1, \dots, x_n} dx_i = \bar{E}_T dT + \bar{E}_P dP + \sum_{i=1}^n \bar{E}_i dx_i, \quad (3)$$

После интегрирования получаем:

$$E_m = \int_{T_0}^T \bar{E}_T dT + \int_{P_0}^P \bar{E}_P dP + \sum_{i=1}^n \int_{x_{i,0}}^{x_i} \bar{E}_{x_i} dx_i = E_T + E_P + E_x = E_{\Phi} + E_x, \quad (4)$$

где  $E_T$  – изотермическая эксергия, связанная с разницей давления между технологическим потоком и окружающей средой,  $KДж/м^3$ ;  $E_P$  – изобарная эксергия, являющаяся следствием отличия температуры вещества от состояния окружающей среды,  $KДж/м^3$ .

Изобарная составляющая физической эксергии

$$E_m = \int_{T_0}^T \bar{E}_T dT + \int_{P_0}^P \bar{E}_P dP + \sum_{i=1}^n \int_{x_{i,0}}^{x_i} \bar{E}_{x_i} dx_i = E_T + E_P + E_x = E_{\Phi} + E_x, \quad (5)$$

Для расчёта энтальпии и энтропии можно использовать следующие выражения [11]:

$$\left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_{P, x_i} = C_p \quad \text{и} \quad \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_{P, x_i} = C_p / T,$$

(6)

где  $C_p$  – массовая теплоёмкость потока при постоянном давлении,  $KДж/Кг \cdot K$ ;  $T$  –

температура технологического потока, °К.

Тогда, принимая  $C_p = const$ , получаем

$$E_T - E_{T_0} = C_p \left[ (T - T_0) - T_0 \ln(T/T_0) \right]. \quad (7)$$

В аппаратах регенерационной установки, где технологические процессы (испарение, конденсация) происходят при постоянной температуре, изменение эксергии

$$E_T - E_{T_0} = \Delta H (1 - T/T_0). \quad (8)$$

Изотермическая составляющая физической эксергии

$$\left( \frac{\partial E_m}{\partial P} \right)_{T, x_i} = \left( \frac{\partial H}{\partial P} \right)_{T, x_i} - T_0 \left( \frac{\partial S}{\partial P} \right)_{T, x_i}. \quad (9)$$

Тогда, используя следующие соотношения

$$\left( \frac{\partial H}{\partial P} \right)_{T, x_i} = V - T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_{P, x_i} \quad \text{и} \quad \left( \frac{\partial S}{\partial P} \right)_{T, x_i} = - \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_{P, x_i}, \quad (10)$$

получаем

$$\left( \frac{\partial E}{\partial P} \right)_{T, x_i} = V - (T - T_0) \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_{P, x_i}. \quad (11)$$

Если газовая смесь (паровая фаза) неидеальна и описывается уравнением состояния со вторым вириальным коэффициентом  $\beta$  [9], то

$$V = \frac{RT}{P} + \beta, \quad (12)$$

где  $\beta$  – второй вириальный коэффициент, являющийся функцией температуры и давления (расчёт коэффициента  $\beta$  производится обычно по уравнениям Бертло или Редлиха и Куонга).

Дифференцируя выражение (12), получаем

$$\left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_{P, x_i} = \frac{R}{P} + \left( \frac{\partial \beta}{\partial T} \right)_{P, x_i}. \quad (13)$$

Следовательно, изменение изотермической эксергии составляет

$$E_p - E_{p_0} = RT_0 \ln(P/P_0) + T_0 (P - P_0) \left( \frac{\partial \beta}{\partial T} \right)_{P, x_i}. \quad (14)$$

При оценке химической эксергии в

качестве окружающей среды принимают идеальный газ, и работу выравнивания химических потенциалов рассматриваемого вещества измеряют суммой энергии, необходимой для осуществления обратимого перевода данного вещества в состояние равновесия с окружающей средой, т.е. в идеальное состояние и эксергия идеального вещества.

Этот перевод может быть осуществлён следующим образом. В начале рассматривают перевод водотопливных фракций ММО при неизменных параметрах процесса испарения из жидкого состояния в парообразное, а далее – перевод паровой фракции жидкости в идеальное состояние.

Уравнение, характеризующее эксергию водотопливных фракций при  $P_0$  и  $T_0$ , имеет вид:

$$E_x = E_p^{ж} + E_p'' + E_u, \quad (15)$$

где  $E_p^{ж}$  – эксергия перехода из жидкости в пар при неизменном составе и параметрах ( $P=idem, T=idem, n_i=idem$ ), КДж/м<sup>3</sup>;  $E_p''$  – эксергия перехода паров жидкости в идеальное состояние при неизменном составе и параметрах, КДж/м<sup>3</sup>;  $E_u$  – эксергия идеального газа состава паров жидкости, КДж/м<sup>3</sup>.

Величину  $E_p^*$  рассчитывают эмпирическим путём с той лишь разницей, что процесс перехода водотопливной фракции ММО из жидкого состояния в пар происходит при температуре кипения  $T_{кип}$ , а затем энергию, затраченную на испарение, приводят к уровню стандартного состояния вещества при  $T_0$ .

Величину  $E_p^*$  при изотермическом расширении рассчитывают следующим образом:

$$E_p'' = H_{ex} - H_{вых} + T_0 \Delta S_{необр}. \quad (16)$$

Величина  $E_u$  представляет собой минимальную работу, которую нужно затратить при обратимом разделении идеальной смеси паров [9]:

$$E_u = -RT_0 \sum x_i \ln g_i x_i, \quad (17)$$

где  $g_i$  – коэффициент активности  $i$ -го компонента.

Тогда, химическая эксергия, возникающая из-за различия составов рассматриваемого вещества и окружающей среды, в процессе разделения

$$E_x = E_p^{жк} + \Delta H + T_0 \Delta S_{необр} - RT_0 \sum x_i \ln y_i x_i \quad (18)$$

С помощью этого выражения можно определить химическую эксергию технологического потока ММО.

Анализ термодинамической эффективности технологических систем в целом или отдельных их элементов проводят на основе эксергетического баланса:

$$\sum E_{подв} = \sum E_{отв} + \sum E_{пот} = \sum E_{отв} + \sum E_{пот}^{вн} + \sum E_{пот}^{вн}, \quad (19)$$

где  $\dot{E}_{подв}$  – подведённые к системе эксергии различных видов,  $КДж/м^3$ ;  $\dot{E}_{отв}$  – отведённые от системы эксергии,  $КДж/м^3$ ;  $\dot{E}_{пот}$  – потери эксергии,  $КДж/м^3$ ;  $\dot{E}_{пот}^{вн}$  – внутренние потери эксергии, связанные с необратимостью процессов, протекающих внутри системы (потери от гидравлических сопротивлений, неравновесных тепло- и массообменных процессов и т.д.),  $КДж/м^3$ ;  $\dot{E}_{пот}^{вн}$  – внешние эксергетические потери, связанные с условиями взаимодействия системы с окружающей средой (неиспользуемая эксергия потоков веществ, выходящая из системы),  $КДж/м^3$ .

Уравнение эксергетического коэффициента полезного действия (КПД), характеризующего термодинамическое совершенство установки, можно записать следующим образом:

$$\eta_e = \frac{\sum \Delta E_{пол}}{\sum \Delta E_{затр}}, \quad (20)$$

где  $\Delta E_{пол}$  – полезная эксергия, произведённая в ходе технологического процесса,  $КДж/м^3$ ;  $\Delta E_{затр}$  – общая затраченная эксергия,  $КДж/м^3$ .

В условиях регенерации ММО эксергетический КПД

$$\eta_e = \frac{\sum \Delta E_{i,p}^{пол} + \sum \Delta E_{i,T}^{пол}}{E_{эл} + \Delta E_Q + \sum \Delta E_{i,p}^{затр} + \sum \Delta E_{i,T}^{затр}}, \quad (21)$$

$\Delta E_{i,p}^{пол}$ ,  $\Delta E_{i,T}^{пол}$ ,  $\Delta E_{i,p}^{затр}$  и  $\Delta E_{i,T}^{затр}$  –

где соответственно изменение полезных и затраченных термомеханических эксергий

компонентов ММО;  $E_{эл}$  – эксергия электроэнергии,  $КДж/КВт$ ;  $\Delta E_Q$  – общие затраты эксергии подведённой и отведённой теплоты,  $КДж/м^3$ .

При этом для расчёта КПД и последующей эксергетической оптимизации технологического процесса целесообразно выразить все величины, входящие в уравнение (15) в явном виде, как функции параметров технологического режима. Тогда выражение (21) позволит достаточно убедительно обосновать наивыгоднейшую с позиции термодинамического анализа схему энерготехнологической установки для регенерации ММО.

Особый интерес представляет термозкономический анализ технологических процессов регенерации ММО, основанный на тесной связи эксергетических и стоимостных показателей. Термозкономическая оценка позволяет установить оптимальный компромисс между термодинамической эффективностью процесса и величиной неэнергетических затрат на его осуществление. Основной целью при этом является минимизация приведенных затрат на единицу эксергии продукта. Критерий оптимизации процесса имеет следующий вид:

$$R_i = \min C = \min \left[ \frac{\sum C_i E_i + \sum K_i}{G_y} \right], \quad (22)$$

где  $C_i$  – стоимость единицы эксергии потоков ММО и энергии,  $КДж/м^3 руб.$ ;  $E_i$  – эксергия ММО,  $КДж/м^3$ ;  $K_i$  – капитальные и эксплуатационные затраты,  $руб.$ ;  $G_y$  – производительность регенерационной установки,  $м^3/ч$ .

Таким образом, проведенная по указанной выше методике термодинамическая оптимизация позволяет надежно выбрать из множества предложенных способов регенерации ММО тот, который обеспечивает наибольшую экономию энергетических ресурсов, а термозкономический анализ дает объективную оценку целесообразности регенерации ММО.

### Библиографический список

1. Григорьев М.А. и др. Качество моторного масла и надежность двигателей. М.: Издательство стандартов. 1981. – 232 с.

2. Мещерин Е.М., Назаров В.И., Нафтуллин И.С. Современные методы исследования, прогнозирования и оптимизации эксплуатационных свойств моторных масел. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1990. – 64 с.

3. Регенерация отработанных масел и их использование. Обз. информ.// К.В. Рыбаков, В.П. Коваленко, В.В. Нигородов. – М.: АгроНИИТЭИИТО, 1989.–26 с.

4. Сурин С.А. Отработанные масла: вторая жизнь // Мир нефтепродуктов. – 2000. – №2 – с. 22–24.

5. Гусев О.Н. Современные методы переработки и рационального использования отработанных масел. – М., 1987. – 56 с.

6. Бутов Н.П. Система восстановления и использования отработанных автотракторных масел в АПК. Автореф. дис. д-ра техн. наук. – Зеленоград, 1996. – 40 с.

7. Потапков А.Г. Совершенствование

технологии регенерации отработанных смазочных масел путем моделирования регенерационного комплекса. Автореф. диссер. канд. техн. наук. – СПб, 1999 – 16 с.

8. Картошкин А.П. Экономия энергетических ресурсов путем создания и реализации комплексной технологии регенерации отработанных смазочных масел для автотракторной техники. Автореф. д-ра техн. наук. – СПб, 2002 – 50 с.

9. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа. – М.: Химия, 1973. – 296 с.

10. Кафаров В.В., Ветохин В.Н. Основы автоматизированного проектирования химических производств.– М.: Наука, 1987. – 624 с.

11. Карапетьянц М.Х. Химическая термодинамика. Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Химия, 1975. – 584 с.

УДК 621.436

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОТОПЛИВА ИЗ ГОРЧИЦЫ

**А.П. Уханов**, доктор технических наук, профессор

ФГОУ ВПО «Пензенская государственная сельскохозяйственная академия»

**В.А. Голубев**, старший преподаватель

ФГОУ ВПО «Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия»

e-mail: golubevugsha@mail.ru

**Ключевые слова:** альтернативное топливо, дизель, растительные масла, горчица, горчичное масло, смесевое растительно-минеральное топливо, теоретические расчеты, показатели.

*Описаны перспективы выращивания горчицы в качестве источника топлива для дизеля, представлены основные характеристики горчичного масла и его смесей с минеральным дизельным топливом. Приведены уточнения к методике и результаты расчета основных показателей рабочего процесса и эффективных показателей дизеля Д-243 при работе на смесевом растительно-минеральном топливе различного состава.*

Увеличение потребления моторных топлив при прогнозируемом снижении производства нефтепродуктов определяет необходимость в перестройке энергетического баланса. Если в 1979 г. на долю нефти приходилось около 50% всех потребляемых энергоносителей, то в настоящее время ее доля составляет лишь около 35%, причем

относительное потребление нефти продолжает неуклонно снижаться. Из-за роста спроса на нефть будет непрерывно нарастать ее дефицит, который к 2025 г. достигнет 16 млн. баррелей (2,5 млн. т.) в день [1].

Переход на альтернативное топливо из возобновляемых источников - один из путей решения данной проблемы. Перспек-