УДК 621.43, 631.37

А.Ш. Хусаинов, А.А. Глущенко, И.Р. Салахутдинов, М.А. Волков

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ

Хусаинов Альберт Шамилевич, доктор технических наук, окончил Ульяновский государственный технический университет, заведующий кафедрой «Проектирование и сервис автомобилей им. И.С. Антонова» Ульяновского государственного университета. Имеет статьи, монографии, учебные пособия и изобретения в области моделирования, проектирования, исследования и оптимизации конструкции тракторов и автомобилей. [e-mail: a.s.khusainov@gmail.com].

Глущенко Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, окончил Ульяновский сельскохозяйственный институт, доцент кафедры «Эксплуатация мобильных машин и технологического оборудования» Ульяновского государственного аграрного университета им. П.А. Столыпина. Имеет статьи, монографии, учебные пособия и изобретения в области моделирования, исследования и оптимизации конструкции тракторов и автомобилей. [e-mail: oilidel@yandex.ru].

Салахутдинов Ильмас Рифкатович, кандидат технических наук, окончил Ульяновскую сельскохозяйственную академию, доцент кафедры «Эксплуатация мобильных машин и технологического оборудования» УлГАУ им. П.А. Столыпина. Имеет статьи, монографии, учебные пособия и изобретения в области моделирования, исследования и оптимизации конструкции тракторов и автомобилей. [e-mail: ilmas.73@mail.ru].

Волков Максим Анатольевич, кандидат физико-математических наук, окончил УлГУ, декан факультета математики, информационных и авиационных технологий УлГУ. Имеет статьи, учебные пособия и изобретения в области моделирования, проектирования сложных технических систем и разработки автоматизированных систем управления. [e-mail: volkovmax1977@gmail.com].

Аннотация

В работе предлагается методика оптимизации выбора набора технологий восстановления эксплуатационных свойств отработанных смазочных масел методом динамического программирования. Каждый вариант технологического процесса имеет различную производительность и себестоимость и характеризуется особой последовательностью изменения показателей качества регенерируемого масла. Делается выбор очередности и содержания технологических операций, обеспечивающих заданные параметры качества восстановления эксплуатационных свойств масла при наименьших затратах труда и времени выполнения. В виде целевой функции принят комплексный показатель, учитывающий производительность и себестоимость регенерации масла. При этом технологический процесс рассматривается как функция изменения приведенной стоимости технологической операции при неизменном времени ее выполнения и изменения времени операции при неизменной приведенной ее стоимости. В соответствии с методами динамического программирования использование системы данных по каждому этапу (технологической операции) позволяет получить рекуррентные уравнения для определения оптимальной технологии с минимальными приведенными затратами и временем выполнения технологических операций. Результатом решения полученных уравнений является массив данных, анализ которых позволяет выбрать технологические операции с оптимальным соотношением времени их проведения и приведенной стоимости работ. Предлагаемая методика оптимизации может быть использована при разработке технологических процессов любого типа производств.

Ключевые слова: технология регенерации, технологическая операция, оптимизация, метод динамического программирования.

doi:

OPTIMAL CHOICE OF RECOVERY TECHNOLOGIES FOR WASTE LUBRICATING OILS

Albert Shamilevich Khusainov, Doctor of Sciences in Engineering; graduated from Ulyanovsk State Technical University; Head of the Department of Design and Service Vehicles at Ulyanovsk State University; an author of articles, monographs, textbooks, and inventions in the field of modeling, designing, researching and optimization of tracks and cars constructions. e-mail: a.s.khusainov@gmail.com.

Andrei Anatolevich Glushchenko, Candidate of Sciences in Engineering; graduated from Ulyanovsk State Agricultural Institute; Associate Professor of the Department of Exploitation of Machinery and Mobile Technological Equipment at Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stoplypn; an author of articles, monographs, textbooks and inventions in the field of modeling, designing, researching and optimization of tracks and cars constructions. e-mail: oildel@yandex.ru.

Ilmas Rifkatovich Salakhutdinov, Candidate of Sciences in Engineering; graduated from Ulyanovsk State Agricultural Academy; Associate Professor of the Department of Exploitation of Machinery and Mobile Technological Equipment at Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stoplypn; an author of articles, monographs, textbooks and inventions in the field of modeling, designing, researching and optimization of tracks and cars constructions. e-mail: ilmas.73@mail.ru.

Maksim Anatolevich Volkov, Candidate of Sciences in Physics and Mathematics; graduated from Ulyanovsk State University; Dean of the Faculty of Mathematics, Information and Aviation Technologies at Ulyanovsk State University, an author of articles, textbooks and inventions in the field of modeling, designing of complex engineering systems and developing of computer-aided control systems. e-mail: volkovmax1977@gmail.com.

Abstract

A technique for an optimal choice of technologies set for recovering the performance properties of waste lubricating oils based on dynamic programming has been described in the article. Each variant of technological operation has a different productivity and costs, also it is characterized by a specific sequence of quality indicator changes for the oil recovery. Authors make a choice of the sequence and content of technological operations which provide the given quality indicators for the recovery of oil performance properties with the lowest cost of labor input and implementation time. A composite indicator has been adopted as a target function which considers the productivity and cost for the oil recovery. The technological process is considered as a changing function of present value for the technological operation in case of its constant implementation time and function of time operation changing in case of its constant present value. According to dynamic programming methods, the use of the system of data on each technological operation stage allows obtaining the recurrent equations to determine the optimal technology with minimal present costs and time for the technological operations implementation. The solution of obtained equations results in the data array. The data analysis allows choosing the technological operations with optimal balance between its implementation time and present costs. The proposed optimization technique can be used in the development of the technological processes of any other type of production.

Key words: recovery technology, technological operation, optimization, dynamic programming method.

ВВЕДЕНИЕ

При решении экологических проблем значительную роль играют такие процессы, как переработка образующихся отходов в виде отработанных нефтепродуктов. Рациональное использование вторичных продуктов основного производства для получения целевых продуктов обеспечивают решение не только экономических проблем, но и снижение экологической напряженности промышленного и сельскохозяйственного секторов экономики. Задача максимального вовлечения отработанных нефтепродуктов в переработку является актуальной в условиях усиливающегося спроса на нефтепродукты и возрастающих требований к их качеству, повышению безопасности и защиты окружающей среды.

Качество восстановления эксплуатационных свойств отработанных смазочных материалов в процессе регенерации во многом определяется используемой технологией, являющейся наиболее дорогостоящим и длительным этапом. Известные технологии имеют ряд недостатков и существенный резерв повышения эффективности, который может быть обеспечен за счет использования научно обоснованных технологических режимов и оптимизации технологического процесса, то есть оптимизации [1]. При решении конкретной за-

дачи оптимизации используется несколько методов. Наиболее широко известны следующие методы: аналитические (поиск экстремума, множителей Лагранжа, вариационного исчисления и др.), математического программирования (динамического, линейного и нелинейного), статистические. Самый простой способ решения задачи – полный перебор всех вариантов. Когда количество вариантов невелико, этот способ вполне приемлем. Однако на практике задачи с небольшим числом вариантов встречаются весьма редко, поэтому полный перебор, как правило, неприемлем из-за чрезмерных затрат вычислительных ресурсов. Вторым, нашедшим наибольшее использование в промышленности, является статистический метод, его применение обусловлено отсутствием достоверной информации о процессах, протекающих во время выполнения технологических операций. Однако данный метод требует существенных затрат времени на установление зависимостей и низкую точность результатов. Одной из особенностей любого технологического процесса является вариантность, которая заключается в возможности получения одного и того же результата различными способами обработки. Эта особенность приводит к использованию большого разнообразия технологического оборудования, пригодного для реализации каждой

операции. Поэтому для решения вопроса оптимизации технологий предлагается метод динамического программирования. Динамическое программирование является наиболее удобным методом решения задач оптимизации многостадийных дискретных процессов, когда общий критерий оптимальности описывается аддитивной функцией критериев оптимальности отдельных стадий производства.

Для реализации данного метода применительно к технологиям производства предлагается методика оптимизации технологического процесса восстановления эксплуатационных свойств методом динамического программирования, целью которого является технологическое обеспечение заданных значений вектора показателей качества восстанавливаемого масла при наименьших затратах труда и материальных ресурсов [2, 3].

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ

Каждый вариант технологического процесса имеет различную производительность и себестоимость и характеризуется особой последовательностью изменения показателей качества регенерируемого масла. Целью является выбор очередности и содержания технологических операций, обеспечивающих заданные параметры качества восстановления эксплуатационных свойств масла при наименьших затратах труда и времени выполнения.

Предположим, что технологический процесс может быть реализован в несколько операций с использованием различного оборудования, обеспечивающего одинаковые параметры по показателям качества выходного продукта. Необходимо устранить неоднозначность выбора технологических операций на каждом этапе технологического процесса. Приняв допущение, что любой из вариантов набора оборудования обеспечивает требуемое качество регенерируемого масла по эксплуатационным показателям, поставлена задача многокритериальной оптимизации по стоимости ресурсов и временных затрат для восстановления свойств масла: $C \rightarrow \min, \tau \rightarrow \min$. Требуется определить состояние технологического процесса, близкое к оптимальному состоянию, с целью оптимизации затрат и получения максимального экономического эффекта, в зависимости от реальных условий протекания технологического процесса. Тогда в виде целевой функции примем комплексный показатель, учитывающий производительность и себестоимость процесса восстановления эксплуатационных свойств:

$$Z = \sum_{i=1}^n C_i \tau_i \rightarrow \min \quad (1)$$

при условии удовлетворения ограничений для каждой из операций:

$$0 \leq C_i \leq C_{imaxdon} \text{ и } 0 \leq \tau_i \leq \tau_{imaxdon},$$

где Z – полные затраты на восстановление, руб.;

i – количество операций технологического процесса;

C_i – приведенная стоимость выполнения i -й операции технологического процесса, включающая все текущие затраты, руб./ч;

τ_i – продолжительность проведения i -й операции технологического процесса, ч.

В систему ограничений для рассматриваемых операций входят максимально допустимая стоимость C_{imax} доп выполнения i -й операции и максимально допустимое время $\tau_{imaxdon}$ выполнения i -й операции. Значения ограничивающих величин C_{imax} доп определяются выражениями (2), устанавливающими связь между обеспечиваемыми параметрами качества получаемого продукта на каждой операции и предельными значениями технологических режимов (3), энергетическими характеристиками процесса и количеством используемых реактивов и материалов (4).

$$C_i = K_{mэ} + 0,8q(m_{i...j}) \leq C_{imaxdon}; \quad (2)$$

$$q(m_{i...j}) = \begin{cases} F_1(y(m)) + \\ + F_2(y(m-m_i), y(m_i), y(m_{i-1}), \dots), \\ \dots, \\ F_n(y(m)) + \\ + F_{2n}(y(m-m_j), y(m_j), y(m_{j-1}), \dots); \end{cases} \quad (3)$$

$$K_{imэ} = \frac{\sum C_э + \sum C_{кз}}{C}, \quad (4)$$

где $K_{imэ}$ – энергоемкость операции, руб.;

q – комплексный показатель качества, учитывающий физико-химические и эксплуатационные свойства продукта;

$q(m_{i...j})$ – изменение качества продукта в зависимости от режимов технологического процесса;

$m_{i...j}$ – режимы технологического процесса;

y – параметр качества продукта;

$\sum C_э$ – стоимость всех энергетических потоков, используемых при выполнении операции, руб.;

$\sum C_{кз}$ – затраты при выполнении операции, руб.;

C – стоимость полученной продукции при выполнении операции, руб.

Значения ограничивающих величин $\tau_{imaxdon}$ определяются исходя из времени, необходимого для проведения операции и обеспечивающего заданные параметры качества получаемого продукта (5), но не приводящего к безвозвратному изменению физико-химических свойств g перерабатываемого материала (6).

$$\tau_i = \tau \left[\left(\frac{g_n - g_n}{g_{nn} - g_n} \right)^{1/2} - 1 \right] \leq \tau_{imaxdon}; \quad (5)$$

$$g = \begin{cases} \frac{1}{\rho} = \frac{b_1}{\rho_1} + \frac{b_2}{\rho_2} + \dots + \frac{b_n}{\rho_n}, \\ \lg \mu = \sum d_i \cdot \lg \mu_i, \\ m_g = \frac{V \cdot 100}{G}, \\ KЧ = \frac{v \cdot c \cdot 56,1}{m_m}, \\ u \, dp, \end{cases} \quad (6)$$

где τ – время, обусловленное технологическим режимом и определяемое от объема перерабатываемой продукции, ч;

g_n, g_n, g_{nn} – комплексный показатель качества физико-химических свойств продукта, соответственно, предельно допустимый, нормативный, поступающей с предыдущей операции;

$b_1, b_2, \dots, b_n$ – объемная доля компонента;

$\rho, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ – плотность соответствующего компонента, кг/м³;

μ – вязкость, Пуаз;

d_i – объем компонента с вязкостью μ_i ;

V – объем компаундируемого масла, м³;

$KЧ$ – коэффициент чистоты;

v – объем стандартного раствора гидроксида калия, израсходованного на титрование, см³;

c – точная концентрация стандартного раствора гидроксида калия, моль/дм³;

m_m – масса навески, г;

56,1 – молекулярная масса гидроксида калия, г/моль.

Рассмотрим технологический процесс последовательного перехода системы из начального состояния в конечное. В этом случае управление можно разбить на количество шагов, соответствующее количеству входящих в процесс операций, и решение будет приниматься последовательно на каждом шаге, а управление будет представлять собой совокупность пошаговых управлений.

Исходя из этого и с учетом целевой функции технологический процесс регенерации в начальный момент имеет приведенную стоимость C_0 и время ее проведения τ_0 и должен на заключительном этапе иметь время τ_1 , а приведенная стоимость должна составить C_1 (рис. 1). То есть $C_1 > C_0$ и $\tau_1 > \tau_0$. Тогда изменение приведенной стоимости технологической операции от

C_0 до C_1 при неизменном времени выполнения операции будет определяться функцией $F(C_{1-1}, \tau_1)$, а изменение времени операции от τ_0 до τ_1 при неизменной приведенной стоимости операции – функцией $G(C_1, \tau_{1-1})$.

При этом определение функций проводится с учетом ограничений в виде параметров качества масла как на начальном этапе, так и после проведения очередной выполняемой операции, а также технико-экономических показателей используемого оборудования и технологических режимов.

Поскольку технологический процесс регенерации состоит из нескольких этапов (рис. 1), для функции $F(C_{1-1}, \tau_1)$ переход системы из начального состояния в конечное будет определяться для значений $C \in \{C_0, C_{0+1}, C_{0+2}, \dots, C_{1-1}\}$ и $\tau \in \{\tau_0, \tau_{0+1}, \tau_{0+2}, \dots, \tau_1\}$, для функции $G(C_1, \tau_{1-1})$ переход будет определяться для значений $C \in \{C_0, C_{0+1}, C_{0+2}, \dots, C_1\}$ и $\tau \in \{\tau_0, \tau_{0+1}, \tau_{0+2}, \dots, \tau_{1-1}\}$.

В соответствии с правилами динамического программирования использование системы данных по каждому этапу (технологической операции) позволяет получить рекуррентные уравнения для определения оптимальной технологии с минимальными приведенными затратами и временем выполнения технологических операций [2, 3]:

$$\begin{cases} 3(C_1, \tau_1) = 0; \\ 3(C_{1-1}, \tau_1) = F(C_{1-1}, \tau_1) + G(C_{+1}, \tau_1) \\ \quad \text{при } C \in \{C_0, C_{0+1}, C_{0+2}, \dots, C_{1-1}\}; \\ 3(C_1, \tau_{1-1}) = G(C_1, \tau_{1-1}) + F(C_1, \tau_{+1}) \\ \quad \text{при } \tau \in \{\tau_0, \tau_{0+1}, \tau_{0+2}, \dots, \tau_{1-1}\}. \end{cases} \quad (7)$$

То есть:

$$3(C, \tau) = \min \{F(C_{1-1}, \tau_1) + G(C_{+1}, \tau), G(C_1, \tau_{1-1}) + F(C, \tau_{+1})\}. \quad (8)$$

Вычисления по записанным рекуррентным соотношениям можно представить в виде таблицы 1, строки которой соответствуют имеющимся значениям времени, а столбцы – имеющимся значениям приведенной стоимости. В каждую клетку, стоящую в пересечении столбца τ и строки C , вносятся соответствующее значение функции $B(C_i, \tau_i)$.

Рис. 1. Схема переходов технологических операций процесса регенерации отработанных смазочных масел

Таблица 1

	C_0	C_{0+1}	C_{0+2}	...	C_1
τ_0	$3(C_0, \tau_0)$	$3(C_{0+1}, \tau_0)$	$3(C_{0+2}, \tau_0)$	...	$3(C_1, \tau_0)$
τ_{0+1}	$3(C_0, \tau_{0+1})$	$3(C_{0+1}, \tau_{0+1})$	$3(C_{0+2}, \tau_{0+1})$	...	$3(C_1, \tau_{0+1})$
τ_{0+2}	$3(C_0, \tau_{0+2})$	$3(C_{0+1}, \tau_{0+2})$	$3(C_{0+2}, \tau_{0+2})$	...	$3(C_1, \tau_{0+2})$
...	...	...	...	...	...
τ_1	$3(C_0, \tau_1)$	$3(C_{0+1}, \tau_1)$	$3(C_{0+2}, \tau_1)$	...	$3(C_1, \tau_1)$

Таблицы составляются для всех технологий с соответствующим набором операций. По полученным данным осуществляется выбор операций с минимальным значением функции $Z(C, \tau)$, из которых и будет сформирован дальнейший технологический процесс регенерации с минимальной приведенной стоимостью и временем восстановления эксплуатационных свойств смазочных масел.

где

$$\left\{ \begin{aligned} 3_1(C_{\Pi_{41}-\Pi_{11}}, \tau_{\Pi_{41}}) &= F(C_{\Pi_{41}-\Pi_0}, \tau_{\Pi_{41}}) + G(C_{\Pi_{41}}, \tau_{\Pi_{41}}) \text{ } npu \text{ } C \in \{C_{\Pi_{11}} C_{\Pi_{21}} C_{\Pi_{31}} C_{\Pi_{41}}\}; \\ 3_1(C_{\Pi_{41}}, \tau_{\Pi_{41}-\Pi_{11}}) &= G(C_{\Pi_{41}}, \tau_{\Pi_{41}-\Pi_{11}}) + F(C_{\Pi_{41}}, \tau_{\Pi_{41}}) \text{ } npu \text{ } \tau \in \{\tau_{\Pi_{11}} \tau_{\Pi_{21}} \tau_{\Pi_{31}} \tau_{\Pi_{41}}\}; \\ 3_2(C_{\Pi_{41}-\Pi_{21}}, \tau_{\Pi_{41}}) &= F(C_{\Pi_{41}-\Pi_{21}}, \tau_{\Pi_{41}}) + G(C_{\Pi_{41}}, \tau_{\Pi_{41}}) \text{ } npu \text{ } C \in \{C_{\Pi_{11}} C_{\Pi_{21}} C_{\Pi_{31}} C_{\Pi_{41}}\}; \\ 3_2(C_{\Pi_{41}}, \tau_{\Pi_{41}-\Pi_{21}}) &= G(C_{\Pi_{21}}, \tau_{\Pi_{41}-\Pi_{11}}) + F(C_{\Pi_{41}}, \tau_{\Pi_{41}}) \text{ } npu \text{ } \tau \in \{\tau_{\Pi_{11}} \tau_{\Pi_{21}} \tau_{\Pi_{31}} \tau_{\Pi_{41}}\}; \\ &\dots\dots\dots; \\ 3_{24}(C_{\Pi_{42}-\Pi_{13}}, \tau_{\Pi_{42}}) &= F(C_{\Pi_{42}-\Pi_{13}}, \tau_{\Pi_{41}}) + G(C_{\Pi_{42}}, \tau_{\Pi_{42}}) \text{ } npu \text{ } C \in \{C_{\Pi_{13}} C_{\Pi_{23}} C_{\Pi_{32}} C_{\Pi_{42}}\}; \\ 3_{24}(C_{\Pi_{42}}, \tau_{\Pi_{42}-\Pi_{13}}) &= G(C_{\Pi_{13}}, \tau_{\Pi_{42}-\Pi_{13}}) + F(C_{\Pi_{42}}, \tau_{\Pi_{42}}) \text{ } npu \text{ } \tau \in \{\tau_{\Pi_{13}} \tau_{\Pi_{23}} \tau_{\Pi_{32}} \tau_{\Pi_{42}}\}. \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Значения каждого уравнения определяются с учетом затрат времени и стоимости проведения соответствующей операции в зависимости от выбранного способа и технологического оборудования. Расчет проводится с использованием аналитических выражений, учитывающих конструктивно-технологические параметры используемого технологического оборудования, параметры технологических режимов, показателей качества обрабатываемого материала в начале и в конце операции. Так для технологии регенерации, включающей следующий набор операций: выпаривание (Π_{11}), центробежная очистка (Π_{22}), коагуляция (Π_{31}), компаундирование с товарными присадками (Π_{41}), определение значений векторов показателей операции осуществляется следующим образом.

Для операции выпаривания (Π_{11}) воды и низкокипящих фракций из масла время выполнения [4–7]:

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ

Практическое использование предлагаемой методики рассмотрим на примере наиболее широко используемых технологий регенерации отработанных смазочных масел, включающих следующие операции: I этап – удаление воды; II этап – удаление нерастворимых примесей; III этап – удаление продуктов разложения и окисления масла (осветление); IV этап – восстановление эксплуатационных свойств компаундированием очищенного масла. На каждом этапе могут использоваться различные способы и технические средства, поэтому возможные варианты технологий с набором способов и последовательностей операций очистки и восстановления эксплуатационных свойств представим в виде графа (рис. 2).

В этом случае рекуррентные соотношения для определения оптимальной технологии с минимальными приведенными затратами и временем технологических операций будут представлены системой уравнений:

$$3(C, \tau) = \min\{F(C_{\Pi_{\mathcal{B}, M}}, \tau_{\Pi_{\mathcal{B}, M}}) + \\ + g(C_{\Pi_{\mathcal{B}, M}}, \tau_{\Pi_{\mathcal{B}, M}}), G(C_{\Pi_{\mathcal{B}, M}}, \tau_{\Pi_{\mathcal{B}, M}-\Pi_{OM}}) + \\ + f(C_{\Pi_{\mathcal{B}, M}}, \tau_{\Pi_{\mathcal{B}, M}})\}; \quad (9)$$

$$\tau_{I_{11}} = \frac{\rho^2 \cdot r^2}{3M \cdot \sigma \cdot \rho_n \cdot \left(\frac{2}{\pi \cdot M \cdot R \cdot T} \right)^{1/2}}, \quad (11)$$

где ρ – плотность масла, кг/м³;

r – радиус капли выпариваемой жидкости, м;

M – молярная масса, кг/моль;

σ – коэффициент поверхностного натяжения;

R – газовая постоянная, Дж/моль·К;

T – термодинамическая температура, К.

Приведенная стоимость выполнения операции Π_{11} будет определяться стоимостью тепловой мощности, затрачиваемой на выпаривание воды и низкокипящих фракций:

$$C_{\Pi_{11}} = \frac{M \cdot C_p \cdot (t_2 - t_1)}{860 \cdot \tau_{\Pi_{11}}} \cdot C_{99}, \quad (12)$$

где M – вес нагреваемого продукта, кг;

C_p – удельная теплоемкость жидкости, ккал/кг·°С;

t_1 – начальная температура продукта, °С;

t_2 – необходимая конечная температура нагрева для выпаривания воды и низкокипящих фракций, °С;

τ – время нагрева, ч;

$C_{ээ}$ – стоимость 1 кВт электроэнергии, руб.

Для операции центробежной очистки (P_{22}) масла от нерастворимых примесей время выполнения [4–7]:

$$\tau_{P_{22}} = \frac{\pi \cdot h_p \cdot (R_u^2 \cdot r_c)}{Q}, \quad (13)$$

где h_p – высота ротора, м;

R_u – внутренний радиус ротора центрифуги, м;

r_c – внутренний радиус слоя масла в роторе центрифуги, м;

Q – объемный расход очищаемого масла, м³/ч.

Приведенная стоимость выполнения операции P_{22} будут определяться суммарной стоимостью энергии, затрачиваемой на период пуска центрифуги, времени раскручивания суспензии и непосредственно времени центробежной очистки:

$$C_{P_{22}} = \left[\frac{m_p \cdot \omega^2 \cdot R_u^2}{2 \cdot \tau_n} + \frac{\pi \cdot h_p \cdot \omega^2 \cdot (R_u^4 - r_c^4)}{4 \cdot \tau_c} + \left(\frac{Q \cdot \omega^2 \cdot R_u^2}{2} \cdot \tau_{P_{22}} \right) \right] \cdot C_{ээ}, \quad (14)$$

где m_p – масса ротора, кг;

ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с;

τ_n – продолжительность пускового периода, ч;

τ_c – продолжительность периода раскручивания суспензии, ч.

Для операции коагулирования (P_{31}) продуктов разложения и окисления масла время выполнения [4, 6]:

$$\tau_{P_{31}} = \frac{3 \cdot \gamma}{8 \cdot n \cdot k \cdot T}, \quad (15)$$

где γ – кинематическая вязкость масла, м²/с;

n – концентрация частиц нерастворимых примесей в масле, ед/м³;

k – постоянная Больцмана, Дж/К.

Приведенная стоимость выполнения операции P_{31} определяется суммарной стоимостью затрачиваемого электролита:

$$C_{P_{31}} = q \cdot Q \cdot C_э, \quad (16)$$

Рис. 2. Граф структурных вариантов технологического процесса регенерации отработанных смазочных масел:

P_{om} – вектор начальных показателей отработанного масла, поступающего на регенерацию;

P_{1i} – вектор показателей технологической операции «обезвоживание масел»;

P_{2i} – вектор показателей технологической операции очистки масел от нерастворимых примесей;

P_{3i} – вектор показателей технологической операции очистки масел от продуктов окисления и разложения;

P_{4i} – вектор показателей технологической операции компаундирования масел для восстановления эксплуатационных свойств;

P_{om} – вектор показателей восстановленного масла

Рис. 3 Графическая интерпретация значений рекуррентных уравнений технологических операций

где V – объем компаундируемого масла, м^3 ;

Рис. 4. Граф структуры технологического процесса регенерации отработанных смазочных масел с минимальными затратами времени и средств

где q – удельный расход электролита, $\text{кг}/\text{м}^3$;

Q – объем обрабатываемого масла, м^3 ;

C_9 – стоимость электролита, $\text{руб.}/\text{кг}$.

Для операции компаундирования (Π_{41}) очищенного масла с товарными присадками время выполнения операции [4–6]:

$$\tau_{\Pi_{41}} = \frac{2,04 \cdot V \cdot r_p \cdot (G_D^2 - r_m^2)}{G_D^4 \cdot q}, \quad (17)$$

r_p – радиус раздела перемешиваемого масла и присадки при перемешивании, м ;

G_D – критерий гидродинамического подобия;

r_m – радиус мешалки, м ;

q – циркуляционный расход перемешиваемого масла, $\text{м}^3/\text{с}$.

Приведенная стоимость компаундирования очищенного масла будет складываться из стоимости затрат на мощность мешалок и приводов и стоимости вводимых присадок:

$$C_{П41} = \left((K_N \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d_m^3) \cdot C_{93} \cdot \tau_{П41} \right) + \left(\sum (q_i \cdot C_{in}) \right), \quad (18)$$

где K_N – коэффициент турбулентности;

ρ – плотность перемешиваемой среды кг/м³;

n – частота вращения мешалки, с⁻¹;

d_m – диаметр мешалки, м;

q_i – количество вводимой i -й присадки, кг;

C_{in} – стоимость вводимой i -й присадки, руб./кг.

Необходимо отметить, что каждому рекуррентному уравнению будут соответствовать свои аналитические выражения продолжительности времени и затрат на выполнение операций.

Результаты вычислений по записанным рекуррентным соотношениям, с учетом введенных аналитических зависимостей, сводятся в таблицу.

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Практическая реализация предлагаемой методики заключалась в определении времени и приведенных затрат на восстановление эксплуатационных свойств отработанных масел по каждой из предполагаемых технологических операций.

Для облегчения обработки массива данных по выбору набора технологических операций результаты расчетов рекуррентных уравнений представлены в виде графика (рис. 3). Анализируя полученные данные установлено, что наименьшие затраты будет иметь технологический процесс регенерации отработанных масел, включающий следующий набор технологических операций (рис. 4): $П_{11}$ – составляющая 0,96% от общих затрат и 10% от общего времени восстановления эксплуатационных свойств отработанного смазочного масла; $П_{21}$ или $П_{22}$ – составляющие, соответственно, 60% и 80%; $П_{31}$ – составляющая, соответственно, 70% и 80%; $П_{42}$ – составляющая 90% от общих затрат времени и стоимости регенерации масла (рис. 4).

Использование разработанной методики оптимизации в автоматизированных системах управления технологическим процессом заключается во включении в состав программного комплекса специализированного программного модуля математической модели. Исходные значения характеристик технологического процесса, оборудования и другие параметры, необходимые для расчетов, размещаются в области памяти системы, соединенной с производственными правилами. Производственные правила формируются и вводятся в оболочку на этапе настройки конфигулятора для решения конкретной задачи. В этом случае процесс настройки программного комплекса не требует программирования, а реализуется вводом аналитических выражений для расчета функции качества и правил расчета ограничений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая методика оптимизации может быть использована при разработке технологических процессов любого производства. Особенностью методики является ее вариативность, поскольку в виде целевой функции может быть принят любой комплексный показатель, учитывающий особенности конкретного производства и необходимых параметров как самого технологического процесса, так и производимого продукта. Кроме того, анализ полученных данных рекуррентных выражений позволит еще на этапе создания технологии провести корректировку по выбору технологического оборудования и его режимов работы для каждой технологической операции. Поэтому использование разработанной методики позволит оптимизировать процесс выбора технологических операций технологий любой сложности и назначения, исключить ошибочные проектные решения, сократить время от начала проектирования до реализации технологий на производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глущенко А.А. Экологически безопасные технологии восстановления эксплуатационных свойств отработанного моторного масла с использованием гидроциклона. – Ульяновск : УГСХА, 2011. – С. 166.
2. Беллман Р. Динамическое программирование. – М. : Изд. иностр. лит., 1960. – 401 с.
3. Черняк, А.А., Черняк Ж.Ю., Метельский Ю.М. Математическое программирование. Алгоритмический подход. – Минск : Выш. шк., 2006. – 352 с.
4. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М. : Химия, 1981. – 812 с.
5. Глущенко А.А. Осушка отработанных масел с использованием деэмульгатора // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии им. П.А. Столыпина. – 2015. – № 1 (29). – С. 106–110.
6. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. – М. : Химия, 1995. – 768 с.
7. Замальдинов М.М., Глущенко А.А. Модульная линия очистки отработанных минеральных моторных масел от загрязнений // Известия МААО. – 2011. – № 11. – С. 16–21.

REFERENCES

1. Glushchenko A.A. *Ekologicheski bezopasnye tekhnologii vosstanovleniia ekspluatatsionnykh svoistv otrabotannogo motornogo masla s ispolzovaniem gidrotsyklona* [Environmental Safe Technologies for the Recovery of Waste Oil Properties using Hydraulic Cyclone]. Ulyanovsk, UISAU Publ., 2011. 166 p.
2. Bellman R. *Dinamicheskoe programmirovaniye* [Dynamic Programming]. Moscow, Izd. inostr. lit. Publ., 1960. 401 p.
3. Cherniak, A.A., Cherniak Zh.lu., Metelskii lu.M. *Matematicheskoe programmirovaniye. Algoritmicheskii*

podkhod [Mathematical Programming. Algorithmic Approach]. Minsk, Vysh. shk. Publ., 2006. 352 p.

4. Gelperin N.I. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii* [Main Processes and Equipment for Chemical Industry]. Moscow, Khimiia Publ., 1981. 812 p.

5. Glushchenko A.A. Osushka otrabotannykh masel s ispolzovaniem deemulgatora [Dehydration of Waste Oils Using a Demulsifier]. *Vestnik Ulyanovskoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii im. P.A. Stolypina* [Proc. of Ulyanovsk State Agrarian University], 2015, no. 1 (29), pp. 106–110.

6. Dytnerskii Iu.I. *Protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii* [Processes and Equipment of Chemical Technology]. Moscow, Khimiia Publ., 1995. 768 p.

7. Zamaltdinov M.M., Glushchenko A.A. Modulnaia liniia ochistki otrabotannykh mineralnykh motornykh masel ot zagriaznenii [Modular Automation Equipment for Decontamination of Waste Mineral Engine Oil]. *Izvestiya MAAO* [Proc. of International Academy of Agrarian Education], 2011, no. 11, pp. 16–21.