

УДК 665.637.88

МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ДОРОЖНЫХ БИТУМОВ ПУТЕМ ОКИСЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ*

Ю.Э. Плешивецца, А.В. Казаринов, М.Ю. Деревянов

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. На основе DEA-метода разработана методика многофакторного анализа процессов производства дорожных битумов, которая позволяет получить интегральные сравнительные оценки, обеспечивающие ранжирование процессов по различным разнородным критериям. Выбраны основные количественные характеристики, качественные показатели и технологические параметры процессов окисления гудронов для формирования целевых функций при решении задач математического программирования. На основе CCR и Super Efficiency моделей DEA-метода сформулированы и решены задачи многофакторного анализа эффективности процессов производства дорожных битумов для фактических значений характеристик сырья и параметров технологических процессов, проведен сравнительный анализ полученных оценок для 64 образцов битума. Результаты проведенных исследований позволяют существенно расширить область применения DEA-метода и создать на его основе программный комплекс для многофакторного анализа и оптимизации процессов производства битумов за счет улучшения качества конечного продукта, снижения ресурсов на его производство и уменьшения негативного воздействия на окружающую среду.

Ключевые слова: Data Envelopment Analysis, многофакторный анализ, дорожный битум, нефтепереработка, технологический процесс, эффективность.

Введение

Нефтепереработка является одной из ведущих отраслей промышленности Российской Федерации, поскольку нефть и нефтепродукты до настоящего времени остаются основным видом топлива, применяются практически во всех отраслях промышленного производства и в бытовых целях. Однако в настоящий момент в нефтяной промышленности Российской Федерации существуют глобальные проблемы, которые являются причинами технологического отставания страны в отдельных отраслях и вызывают серьезные негативные экологические последствия. Данные проблемы остаются нерешенными на фоне происходящего

* Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 20-08-00353, 20-08-00240.

Плешивецца Юлия Эдгаровна (д.т.н., профессор), профессор кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».

Казаринов Артем Витальевич, магистрант.

Деревянов Максим Юрьевич (к.т.н., доцент), доцент кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».

в мире постепенного снижения запасов нефтяного сырья при увеличении спроса на нефть и нефтепродукты.

Важнейшими задачами Концепции национальной безопасности России [1] являются переход на рациональное применение невозобновляемых ресурсов энергии, разработка и внедрение безопасных с экологической точки зрения производств, уменьшение техногенного загрязнения окружающей среды за счет повышения эффективности и глубины процессов нефтепереработки. В связи с этим на нефтеперерабатывающих предприятиях проводятся реконструкции блоков вакуумной перегонки мазута с целью максимального увеличения отбора вакуумных газойлей, являющихся ценным сырьем вторичных процессов переработки нефти. Получаемые в условиях повышенного отбора газойлей нефтяные остатки кардинально меняют свои свойства, в том числе из-за увеличения вязкостных характеристик, повышения коксуемости, снижения содержания в углеводородном составе масляных компонентов, увеличения содержания смол и асфальтенов. Все эти изменения в процессах нефтепереработки существенно влияют на свойства дорожного битума, производимого путем окисления гудрона. От качества производимого битума во многом зависит состояние дорог в целом, а от них, в свою очередь, зависит нормальное функционирование предприятий промышленности, сельского хозяйства, снабжения и торговли.

В настоящее время потребность России в качественном дорожном битуме велика, и ожидается, что спрос на него постоянно будет только возрастать. В этой связи особенно актуальной представляется рассматриваемая в данной работе задача многокритериальной оценки технологического процесса производства окисленных битумов с целью повышения его эффективности. Решение этой задачи позволит углубить процесс переработки тяжелых нефтяных остатков при одновременном решении проблемы повышения качества дорожных покрытий и других побочных и конечных продуктов нефтепереработки при снижении негативного воздействия на окружающую среду.

Анализ литературных источников показал, что как в зарубежных, так и в отечественных работах недостаточно полно представлены системные подходы к решению указанной проблемы, применение которых позволит повысить эффективность процессов нефтепереработки за счет улучшения качества конечного продукта при снижении ресурсопотребления и увеличении экологической безопасности при его производстве.

В работе предлагается новый подход к многофакторному анализу процессов производства дорожных битумов путем окисления продуктов нефтепереработки, который позволяет получить их интегральные сравнительные оценки, обеспечивающие ранжирование процессов по различным разнородным критериям.

С целью проведения многофакторного анализа были выбраны основные количественные характеристики, качественные показатели и технологические параметры процессов окисления гудронов для формирования целевых функций при решении задач математического программирования, сформулированных на основе CCR и Super Efficiency моделей DEA-метода.

Методика многофакторного анализа на основе DEA-метода

В работе предлагается основанный на DEA-методе единый подход к решению задачи сравнительной оценки разнородных показателей (критериев), характеризующих процессы производства дорожных битумов путем окисления гудронов.

Выбор DEA-метода как основы для построения алгоритма многофакторной сравнительной оценки технологических процессов производства битумов объясняется прежде всего удобством его применения для решения аналогичных прикладных задач: возможностью получения сравнительных относительных многофакторных оценок и легкостью визуализации полученных результатов в наглядной форме. При этом DEA-метод широко применяется для получения сравнительных оценок эффективности сложных объектов, ключевые показатели функционирования которых определяются в терминах технико-экономических, эксплуатационных, логистических, энергетических и других разнородных характеристик.

Кроме того, данный метод обладает существенными преимуществами перед известными методами многофакторного анализа, сравнительная характеристика которых представлена на рис. 1. Указанные преимущества в основном сводятся к отсутствию необходимости учета субъективных экспертных мнений, которые могут приводить к противоречивым и необоснованным выводам при ранжировании анализируемых объектов по выбранным разнородным критериям эффективности. Кроме того, отдельного внимания заслуживает тот факт, что факторы, входящие в критерий эффективности и формирующие соответствующую целевую функцию, могут иметь совершенно разный физический смысл и измеряться в различных единицах.

Согласно теории DEA-метода, для сравнительного анализа численных оценок комплексного критерия (показателя) эффективности каждого из N объектов на основе ССР модели применяется следующий подход. Предполагается, что величины всех сравнительных оценок некоторого критерия эффективности f имеют конечные значения и необходимо проранжировать эти значения на числовом интервале $[0, 1]$. Тогда задача многофакторной сравнительной оценки группы образцов сводится к задаче математического программирования на максимум критерия эффективности f , который представляет собой отношение взвешенной суммы выходных факторов к взвешенной сумме входных параметров.

Выходные параметры Y_1, Y_2, \dots, Y_k подбираются так, чтобы каждый из них характеризовал положительный вклад в суммарный показатель эффективности объекта f . В качестве выходных параметров можно принять различные характеристики, которые характеризуют разнообразные аспекты функционирования объектов: производственно-технологические (объем и качество конечной продукции, надежность, долговечность), экономические (прибыль, доход, рентабельность), рыночные (емкость рынка, число связей с контрагентами) и другие.

Эти выходные факторы могут иметь существенно отличающиеся значения, быть несвязанными и несопоставимыми и даже противоречить друг другу. При этом требуется, чтобы выходные характеристики можно было охарактеризовать численным значением, а увеличение каждого из параметров Y_i приводило бы к возрастанию суммарного показателя эффективности f :

$$\frac{\partial f(Y_1, Y_2, \dots, Y_k)}{\partial Y_i} > 0, i = 1, 2, \dots, k. \quad (1)$$

Входные параметры X_1, X_2, \dots, X_m подбираются так, чтобы уменьшение каждого из них увеличивало суммарный показатель эффективности f . В основном входными параметрами являются разнообразные характеристики задействованных в осуществлении производственно-технологического процесса ресурсов. Входные параметры могут характеризовать финансовые, материальные, энергетические, информационные, трудовые, сырьевые, капитальные и другие ресурсы.

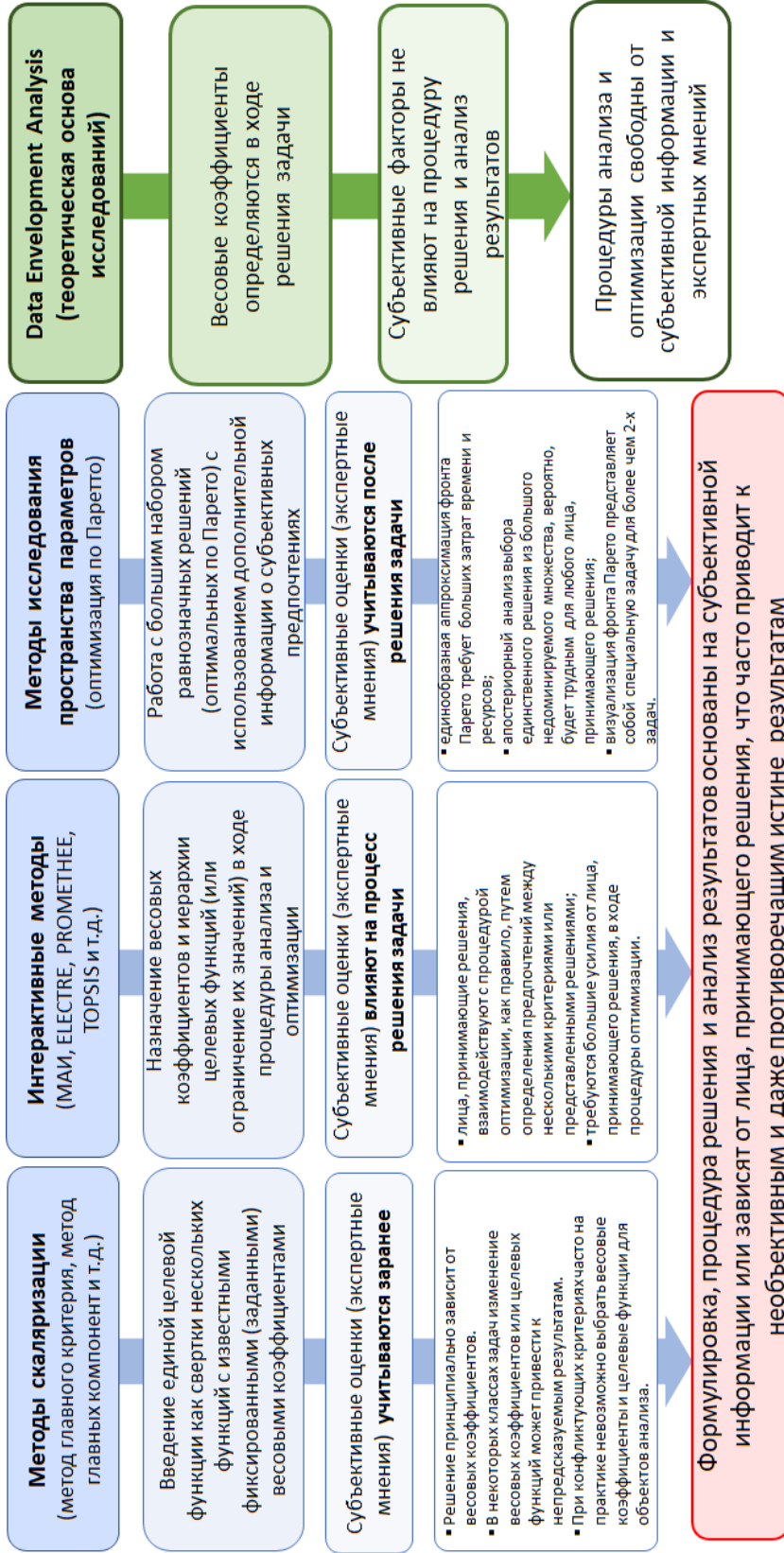


Рис. 1. Сравнение методов многофакторного анализа и многокритериальной оптимизации

Повышение затрат приводит к снижению эффективности анализируемых объектов сравнения, поэтому для входных параметров должны выполняться условия:

$$\frac{\partial f(X_1, X_2, \dots, X_m)}{\partial X_l} < 0, l = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

Конкретную численную величину оценки показателя эффективности f согласно ССР модели следует отыскивать для каждого из N объектов путем максимизации f на множестве значений весовых коэффициентов u, v , принадлежащих области определения G .

Тогда задача отыскания для j -го объекта оценки обобщенного показателя сравнительной эффективности f_j и соответствующих весовых коэффициентов u_{ij} и v_{lj} может быть сформулирована следующим образом:

$$f_j = \frac{u_{1j} \cdot Y_{1j} + u_{2j} \cdot Y_{2j} + u_{3j} \cdot Y_{3j} + \dots + u_{kj} \cdot Y_{kj}}{v_{1j} \cdot X_{1j} + v_{2j} \cdot X_{2j} + v_{3j} \cdot X_{3j} + \dots + v_{mj} \cdot X_{mj}} \rightarrow \max_{u_{ij}, v_{lj} \in G} \quad (3)$$

при наличии ограничений:

$$\frac{u_{1j} \cdot Y_{1j} + u_{2j} \cdot Y_{2j} + \dots + u_{kj} \cdot Y_{kj}}{v_{1j} \cdot X_{1j} + v_{2j} \cdot X_{2j} + \dots + v_{mj} \cdot X_{mj}} \leq 1, \forall \left(\begin{array}{l} j = \overline{1, N}; i = \overline{1, k}; l = \overline{1, m}; \\ \bar{u}_{ij} > 0; \bar{v}_{lj} > 0 \end{array} \right), \quad (4)$$

где u_{ij} и v_{lj} – весовые коэффициенты, характеризующие относительный вклад каждого из выходных и входных параметров соответственно в суммарный показатель эффективности.

Система соотношений (1) и (2) представляет собой N задач математического программирования. В результате их решения определяются относительные показатели эффективности f_j для каждого из N объектов в виде ранжированных на единичном интервале $[0, 1]$ численных оценок, а также происходит определение соответствующих весовых коэффициентов u_{ij} и v_{lj} ($i = 1, 2, \dots, k, l = 1, 2, \dots, m$) в функционале (1).

Модель Super-efficiency (суперэффективности) применяется в случаях, когда несколько объектов сравнения имеют оценки эффективности, равные 1, при этом необходимо выделить наилучший объект сравнения в анализируемой группе. Предлагается подход, основанный на использовании базовой модели Super-efficiency DEA-метода, который заключается в исключении из ограничений вида (2) эффективных объектов с оценкой, равной 1.

Формулировка ЗМП на основе модели Super-efficiency для получения сравнительных оценок эффективности объектов может быть представлена аналогично базовой ССР модели, однако задача определения эффективности объектов сравнения будет заключаться в максимизации функционала при исключении из рассмотрения ряда ограничений:

$$S_j = \frac{\bar{u}_{1j} Y_{1j} + \bar{u}_{2j} Y_{2j} + \dots + \bar{u}_{kj} Y_{kj}}{\bar{v}_{1j} X_{1j} + \bar{v}_{2j} X_{2j} + \dots + \bar{v}_{mj} X_{mj}} \rightarrow \max_{(\bar{u}_{ij}, \bar{v}_{lj}) \in \bar{G}_j}; \quad (5)$$

$$\frac{\bar{u}_{1j} Y_{1j} + \bar{u}_{2j} Y_{2j} + \dots + \bar{u}_{kj} Y_{kj}}{\bar{v}_{1j} X_{1j} + \bar{v}_{2j} X_{2j} + \dots + \bar{v}_{mj} X_{mj}} \leq 1, \forall \left(\begin{array}{l} j = \overline{1, N}; j \neq n; i = \overline{1, k}; \\ l = \overline{1, m}; \bar{u}_{ij} > 0; \bar{v}_{lj} > 0 \end{array} \right). \quad (6)$$

Результатом решения ЗМП (3) и (4) являются сравнительные оценки, находящиеся в интервале $[0, \infty)$, при этом объект сравнения, имеющий максимальную оценку эффективности, может считаться наилучшим в группе при заданных условиях. Неэффективные по базовой CCR модели объекты с оценкой меньше 1 не изменят свои сравнительные оценки по модели Super-efficiency.

Исходные данные для многофакторного анализа

Для проведения многофакторного анализа технологических процессов получения окисленного битума с помощью DEA-метода были собраны экспериментальные данные о 64 образцах битумов, произведенных путем окисления гудронов на Ачинском нефтеперерабатывающем заводе (АНПЗ), в Ангарской нефтехимической компании (АНХК) и Рязанской нефтеперерабатывающей компании (РНПК) из нефтесмесей Восточносибирского и Ванкорского месторождений. Эти данные содержат детализированные сведения о свойствах исходной нефти, химических, физико-механических свойствах сырья, технологических параметрах проведения процесса и физико-механических и химических свойствах окисленного битума.

Свойства битума как сложного объекта исследования определяются как соотношением входящих в его компонентный состав масел, смол и асфальтенов и др., так и свойствами исходного сырья, подвергаемого процессу окисления, и многими другими параметрами. Например, повышение содержания асфальтенов и смол влечет за собой возрастание твердости, температуры размягчения и хрупкости битума.

В ходе исследования были выбраны основные количественные характеристики, качественные показатели и технологические параметры процессов окисления гудронов для формирования целевых функций при решении задач математического программирования (3)–(4) и (5)–(6).

Вся собранная информация по указанным свойствам и технологическим параметрам проведения процесса окисления 64 образцов битумов была систематизирована и классифицирована так, как представлено в табл. 1–4 (для примера представлены 7 образцов).

Табл. 1 содержит следующие сведения о свойствах исходной нефти и физико-механических свойствах сырья для различных образцов: Сера общ. – содержание серы в нефти, %; Вязкость при 50 °С – вязкость нефти при 50 °С; Коксуемость по Конрадсону – коксуемость нефти, определяемая по методу Конрадсона по ГОСТ 19932-99, % мас; Ni – содержание никеля в нефти, ppm; V – содержание ванадия в нефти, ppm; Парафины – содержание парафинов в нефти, % мас; Плотность – плотность нефти, кг/м³; ВУ – условная вязкость нефти, с; Вязкость при 80 – вязкость нефти при 80 °С, мм²/с; КиШ – температура размягчения сырья, определяемая по методу кольца и шара, °С.

Табл. 2 содержит следующие данные о химических свойствах сырья и параметрах окисления для различных образцов: ПНУ – содержание парафино-нафтеновых углеводородов в сырье, %; Смолы – содержание смол в сырье, %; Асфальтены – содержание асфальтенов в сырье, %; Легкая ароматика – содержание моноциклоароматических углеводородов в сырье, %; Средняя ароматика – содержание бициклоароматических углеводородов в сырье, %; Тяжелая ароматика – содержание полициклоароматических углеводородов в сырье, %; Ароматика (общ) – общее содержание ароматических углеводородов в сырье, %; АУ/ПНУ – отно-

шение содержания в сырье ароматических углеводородов к парафино-нафтеновым углеводородам; Асф/См – отношение содержания в сырье асфальтенов к смолам; Т – температура проведения процесса окисления, °С; Расход воздуха – расход воздуха при проведении процесса окисления, м³/ч; Продолжительность – продолжительность проведения процесса окисления, ч.

В табл. 3 представлены следующие физико-механические свойства окисленного битума для различных образцов: Т_{хр} – температура хрупкости сырья, °С; ΔКиШ – изменение температуры размягчения сырья по методу кольца и шара после его прогрева, °С; Т_{хр} после прогр – температура хрупкости сырья после прогрева, °С; К η60 – коэффициент возрастания динамической вязкости; П25 – пенетрация битума при 25 градусах, 0,1 мм; П0 – пенетрация битума при 0 градусах, 0,1 мм; Д25 – дуктильность битума при 25 °С, см; Д0 – дуктильность битума при 0 градусах, см; η60 – динамическая вязкость битума, Па·с; ν135 – кинематическая вязкость битума, мм²/с; П25 – Остаточная пенетрация битума, %; Д25 после прогр – дуктильность битума при 25 °С после прогрева, см.

Табл. 4 содержит следующие данные о химических свойствах окисленного битума для различных образцов: ПНУ – содержание парафино-нафтеновых углеводородов в битуме, %; Смолы – содержание смол в битуме, %; Асфальтены – содержание асфальтенов в битуме, %; Ароматика (общ) – общее содержание ароматических углеводородов в битуме, %; АУ/ПНУ – отношение содержания в битуме ароматических углеводородов к парафино-нафтеновым углеводородам; Асф/См – отношение содержания в битуме асфальтенов к смолам; Легкая ароматика – содержание моноциклоароматических углеводородов в битуме, %; Средняя ароматика – содержание бициклоароматических углеводородов в битуме, %; Тяжелая ароматика – содержание полициклоароматических углеводородов в битуме, %.

Таблица 1

Свойства исходной нефти и физико-механические свойства сырья для различных образцов

Наименование образца	№ Образца	Нефть								Физ-мех свойства сырья		
		Выход, % от нефти	Сера общ, % мас.	Вязкость при 50 °С, мм ² /с	Коксеемкость по Конрадсо	Ni, ppm	V, ppm	Парафины, % мас.	Плотность, кг/м ³	ВУ ₈₀ , с	Вязкость при 80, мм ² /с	КиШ, °С
гудрон 17 с (обр №1)	1	100	0,55	3,71	2,21	6,20	5,20	2,70	846,20	17	339,8	21,5
гудрон 22 с (обр №2)	2	100	0,55	3,71	2,21	6,20	5,20	2,70	846,20	22	466,9	24
гудрон 29,7 с (обр №3)	3	100	0,55	3,71	2,21	6,20	5,20	2,70	846,20	29,7	625	22,4
Гудрон 34 с (обр №4)	4	100	0,55	3,71	2,21	6,20	5,20	2,70	846,20	34,1	778,67	25,6
Гудрон 38 с (обр №5)	5	100	0,55	3,71	2,21	6,20	5,20	2,70	846,20	38	882,1	25,7
Гудрон 59 с (обр №6)	6	100	0,55	3,71	2,21	6,20	5,20	2,70	846,20	58,7	1381	26,3
Гудрон 64,2 с (обр №7)	7	100	0,55	3,71	2,21	6,20	5,20	2,70	846,20	64,2	1411	26,5

Таблица 2

Химические свойства сырья и параметры процесса окисления для различных образцов

№ Образца	Химические свойства сырья									Параметры окисления, °С		
	ПНУ	Смолы	Асфальтены	Легкая ароматика	Средняя ароматика	Тяжелая ароматика	Ароматика (общ)	АУ/ПНУ	Асф/См	Т, °С	Расход воздуха, м ³ /ч	Продолжит., ч
1	30,1	18,9	3,1	14,8	6,6	26,5	47,9	1,59136	0,16402	250	5	11
2	29,8	19,9	3,2	12,8	6,5	27,8	47,1	1,58054	0,16080	250	5	10,5
3	28,4	21,8	5,4	7,3	5,6	31,5	44,4	1,56338	0,24771	250	5	9,2
4	27,1	20,9	3,4	14	4,9	29,7	48,6	1,79336	0,16268	250	5	9,5
5	25,3	22,2	4,3	9,5	5,9	32,8	48,2	1,90514	0,19369	250	5	9,4
6	18,3	29,6	6,1	6,7	5,1	34,2	46	2,51366	0,20608	250	5	9
7	18	31	6,5	6,2	3,8	34,5	44,5	2,47222	0,20968	250	5	8,5

Физико-механические свойства окисленного битума для различных образцов

№ Образца	Физико-химические свойства окисленного битума											
	Тхр, °С	$\Delta KuIII$, °С	Тхр после прогр, °С	К η_{60}	Π_{25} , 0,1 мм	Π_0 , 0,1 мм	Д25, см	Д0, см	η_{60} , Па·с	ν_{135} , мм ² /с	Π_{25} , % ост	Д25 после прогр, см
1	-28	8,5	-26	6	71	31	60	3,5	203	453	49	12
2	-27	8	-26	5,5	68	30	72	3,4	213	465	52	16
3	-26	7,3	-26	5	67	27	65	3,3	224	456	52	18
4	-26	8,1	-24	5,7	68	30	67	3,4	243	487	56	16
5	-26	7,8	-24	5,9	68	29	68	3,6	256	489	54	18
6	-25	6,8	-23	3,7	64	26	92	2	314	505	64	22
7	-24	6	-24	3	62	25	102	2	356	523	65	37

Таблица 4

Химические свойства окисленного битума для различных образцов

№ Образца	Химические свойства окисленного битума								
	ПНУ	Смолы	Асфальтены	Ароматика (всего)	Ау/ПНУ	Асф/См	Легкая ароматика	Средняя ароматика	Тяжелая ароматика
1	30	17,8	23,1	29,1	0,97000	1,29775	5	3,6	20,5
2	29,8	19,5	20,2	30,5	1,02349	1,03590	5,9	3,8	20,8
3	28	20,7	21,4	29,9	1,06786	1,03382	3,3	2,6	24
4	27	19,9	20,1	33	1,22222	1,01005	4	3,3	25,7
5	25,4	21,9	19,7	33	1,29921	0,89954	3,7	3,5	25,8
6	18,2	30	16,1	35,7	1,96154	0,53667	3,7	2,1	29,9
7	18	31,6	16,5	33,9	1,88333	0,52215	3,1	2,6	28,2

Многофакторный анализ влияния технологических параметров окисления на качество конечной продукции

На основе DEA-метода предлагается сформулировать задачу многофакторного анализа влияния технологических параметров процессов окисления на качество дорожного битума как ЗМП.

Для многофакторного анализа влияния параметров процессов окисления предлагается провести сравнение образцов с учетом температуры и длительности процесса окисления, поскольку эти параметры не только влияют на показатели качества конечного продукта, но и характеризуют затраты ресурсов на проведение процесса. Здесь и далее для оцениваемых по эффективности их функционирования объектов сравнения будет принято сокращение DMU (с англ. decision making unit) – единица принятия решения.

Для многофакторного анализа влияния технологических параметров окисления на качество конечной продукции каждый образец битума, являющийся объектом сравнения (DMU), может быть представлен в виде блока (рис. 2).

В качестве компонентов вектора входа, входящих в формулировку ЗМП, предлагается рассматривать следующие параметры, характеризующие затраты на реализацию технологического процесса:

X_1 – температура проведения процесса окисления, °С;

X_2 – продолжительность проведения процесса окисления, часы.



Рис. 2. Задача многофакторного анализа влияния технологических параметров процесса окисления на качество дорожного битума

В качестве выходных параметров, положительно влияющих на оценку эксплуатационных характеристик битума, предлагается рассматривать следующие параметры, которые наиболее существенно влияют на оцениваемое качество битума:

- Y_1 – пенетрация битума при 25 градусах, 0,1 мм;
- Y_2 – пенетрация битума при 0 градусах, 0,1 мм;
- Y_3 – дуктильность битума при 25 градусах, см;
- Y_4 – остаточная пенетрация после прогрева в тонкой пленке, %;
- Y_5 – температура хрупкости битума, °С.

Для указанных параметров были решены задачи многофакторного анализа, сформулированные согласно DEA-методу как ЗМП (3)–(4) и (5)–(6) на основе CCR модели и модели Superefficiency соответственно. Как показано выше, решение задачи многофакторного анализа сводится к решению N задач математического программирования, которые позволяют получить сравнительные оценки для каждого образца битума и соответствующие входным и выходным параметрам весовые коэффициенты, определяемые в ходе решения данной задачи.

Результаты расчетов сравнительных оценок образцов, полученные в ходе решения задачи (3)–(4) на основе модели CCR, представлены на рис. 3, а результаты решения задачи (5)–(6) на основе модели Superefficiency – на рис. 4.

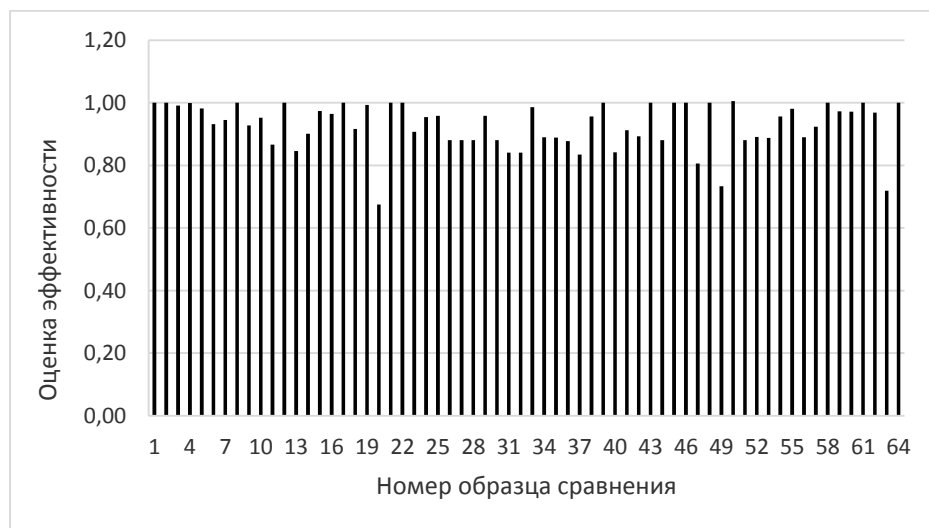


Рис. 3. Сравнительный анализ влияния параметров процесса окисления на качество готового битума на основе модели CCR



Рис. 4. Сравнительный анализ влияния параметров процесса окисления на качество готового битума на основе модели Superefficiency

Как видно из представленных выше диаграмм (рис. 3 и 4), модель Superefficiency гораздо более информативна для выявления наилучших образцов, поэтому в дальнейших расчетах применяется только эта модель.

Анализ полученных результатов показал, что лучшими образцами с точки зрения наименьших затрат ресурсов на реализацию технологических процессов при обеспечении требуемого качества готовой продукции являются образцы № 8, 12, 17, 22, 39, 45 и 64. При этом величина сравнительной оценки образца 64 свидетельствует о том, что соотношение затраченных на его производство ресурсов и качества конечного продукта является наилучшим по сравнению со всеми остальными образцами в анализируемой группе. Данный вывод можно объяснить оптимальным составом сырья и правильно подобранными параметрами технологического процесса. Это обеспечивает высокое качество продукции при наименьших затратах на проведение технологического процесса.

Представленные результаты позволяют определить, что образцы № 20, 49 и 63 имеют наименьшую сравнительную оценку, требуют пересмотра технологического режима и других модификаций производственного процесса.

Многофакторный анализ влияния состава исходного сырья на качество конечной продукции

Различные эксплуатационные показатели качества окисленного дорожного битума во многом зависят от его группового углеводородного состава, определяемого углеводородным составом вводимого в колонну окисления исходного гудрона.

На основе DEA-метода предлагается сформулировать задачу многофакторного анализа влияния физико-химических свойств сырья на качество дорожного битума.

Данная задача позволяет выявить многофакторные зависимости группового углеводородного состав сырья на качество образцов битума, при этом сравнение

может быть проведено по отклонениям от рекомендуемого состава сырья и свойствам готового продукта.

Для многофакторного анализа влияния состава исходного сырья процесса окисления на качество конечной продукции каждый образец битума, являющийся объектом сравнения (DMU), может быть представлен в виде блока (рис. 5).



Рис. 5. Задача многофакторного анализа влияния состава исходного сырья на качество дорожного битума

В качестве компонентов вектора входа, входящих в формулировку ЗМП для сравнительной оценки качества образцов в зависимости от свойств сырья, предлагается рассматривать следующие параметры, отрицательно влияющие на свойства битума:

X_1 – отклонение между оптимальным соотношением асфальтенов к смолам и их фактическим значением;

X_2 – отклонение между оптимальным соотношением ароматических углеводородов к парафино-нафтеновым углеводородам и их оптимальным значением;

X_3 – температура размягчения сырья по КиШ, °С.

В качестве выходных параметров, положительно влияющих на оценку эксплуатационных характеристик битума, предлагается рассматривать следующие параметры, которые наиболее существенно влияют на оцениваемое качество битума:

Y_1 – пенетрация битума при 25 градусах, 0,1 мм;

Y_2 – пенетрация битума при 0 градусах, 0,1 мм;

Y_3 – дуктильность битума при 25 градусах, см;

Y_4 – динамическая вязкость битума, Па·с;

Y_5 – температура хрупкости битума, °С.

Для многофакторного анализа влияния физико-химических свойств сырья на качество дорожного битума в соответствии с представленным на рис. 5 выбором параметров была сформулирована согласно DEA-методу ЗМП (5)–(6) на основе модели Superefficiency. В результате решения ЗМП (5)–(6) были получены сравнительные оценки в интервале $[0, \infty)$, которые представлены на рис. 6.

Анализ полученных результатов показал, что лучшими образцами с точки зрения соотношения качества исходного сырья и качества готовой продукции являются образцы под номерами № 1, 3, 8, 12, 15, 18, 25, 43, 48, 50 и 57. При этом образец № 57 является наилучшим в анализируемой группе, поскольку его сравнительная оценка равна максимальной величине 1,5. Этот результат объясняется оптимальным составом исходного сырья, включающим гудрон и введенный затемненный вакуумный газойль, что позволяет обеспечить высокие эксплуатационные характеристики получаемого битума.

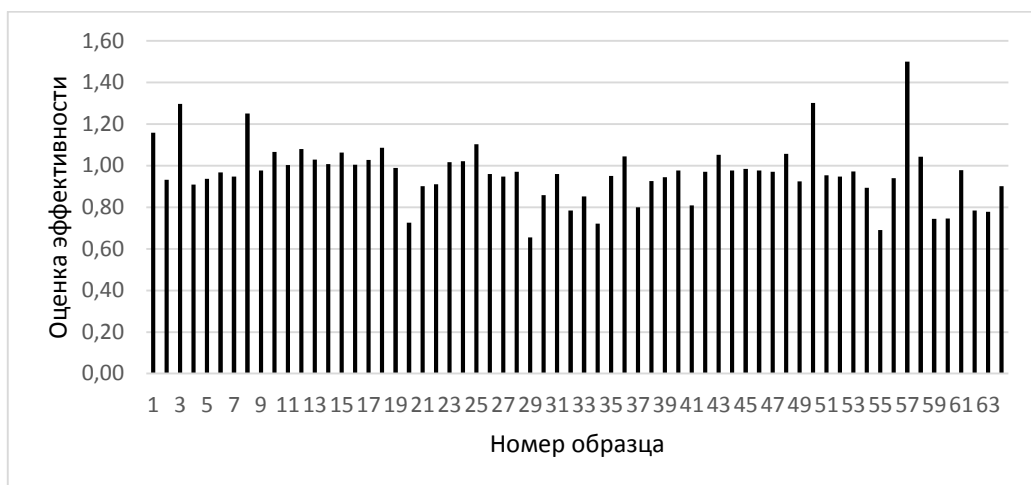


Рис. 6. Сравнительные оценки влияния состава сырья на качества готового битума на основе модели SE

Представленные результаты позволяют определить, что образцы № 20, 29, 34, 55, 59, 60 имеют наименьшую сравнительную оценку, следовательно, необходимо провести модификацию углеводородного состава, оптимизировать параметры технологического режима или принять другие меры.

Выводы

Результаты демонстрируют необходимость дальнейших модификаций и оптимизации технологий получения дешевого качественного дорожного битума из утяжеленного сырья.

Подтверждена эффективность применения DEA-метода для сравнения характеристик образцов битума по моделям многофакторного анализа при условии правильного подбора входных и выходных параметров.

Выявлено, что при большом количестве объектов и параметров сравнения анализ сравнительной характеристики рекомендуется выполнять на основе модели суперэффективности DEA-метода для получения наиболее показательных относительных оценок лучших образцов.

Выявлена необходимость дальнейших исследований влияния изменений параметров технологического процесса и свойств сырья на сравнительную оценку образцов битума в анализируемой группе.

В целом в работе получены следующие результаты:

- проведен комплексный анализ производства дорожных битумов; собрана, классифицирована и проанализирована информация по 64 образцам исходного сырья и получаемого из них окисленного битума;

- выбраны и обоснованы основные количественные характеристики, качественные показатели и технологические параметры процессов нефтепереработки при производстве дорожных битумов;

- обоснована необходимость многофакторного анализа существующих процессов производства дорожных битумов на нефтеперерабатывающих предприятиях;

- разработана методика анализа процессов производства дорожных битумов на основе DEA-метода с целью выявления их принципиальных закономерностей, количественного и качественного оценивания их основных характеристик и свойств;

– на основе CCR и Super Efficiency моделей DEA-метода сформулированы и решены задачи многофакторного анализа эффективности процессов производства дорожных битумов для фактических значений характеристик сырья и параметров технологических процессов, проведен сравнительный анализ полученных решений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О Концепции национальной безопасности Российской Федерации. Указ Президента Российской Федерации от 10.01.2000 № 24.
2. Орлов В.П. Государство и недропользование // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление, 2001.
3. Муртазин Т.М., Ризванов Т.М., Нигматуллин В.Р., Кутьин Ю.А., Теляшев Э.Г. Оперативное управление процессом компаундирования битумов // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2006. – С. 4–6.
4. Васильев А.В., Пименов А.А. Анализ динамики современных требований к нефтяным дорожным битумам // XV Всероссийская конференция «Химия и инженерная экология» с международным участием. – 2015. – С. 81–82.
5. Сибгатуллина Р.И., Абдуллин А.И., Емельянычева Е.А., Бикмухаметова Г.К. Влияние параметров окисления гудронов на свойства конечного битумного материала. Кинетические особенности окисления нефтяных остатков до битума // Вестник технологического университета. – 2016. – № 2. – С. 41–43.
6. Руденская И.М. Нефтяные битумы. – М.: Высшая школа; МАДИ, 1964.
7. Производство окисленных битумов: Метод. пособие. – Казань: Казанский федеральный университет, 2013.
8. Баннов П.Г. Процессы переработки нефти. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 2001.
9. Гун Р.Б. Нефтяные битумы. – М.: Химия, 1973.
10. Танашиев С.Т., Умбетов У.У., Токтагулова У.С., Дилдабаева М.С. Возможность прогнозирования оптимальной технологии производства окисленных битумов по химическому составу перерабатываемой нефти. – Шымкент: Юж.-Казахстанский госуниверситет, 2020.
11. Пажитова Н.П., Потанова Т.В. Исследование свойств битумов, применяемых в дорожном строительстве. – М.: Труды СоюзДорНИИ, 1970.
12. Thierry Post, Jaap Spronk. Performance benchmarking using interactive data envelopment analysis. Eur. J. Opl. Res. 115. 1999.
13. Norio Hibiki, Toshiyuki Sueyoshi. DEA sensitive analysis by changing a reference set: regional contribution to Japanese industrial development. Omega, Int. J. Mgmt. Sci. 27. 1999.
14. Кривоножко В.Е., Пропой А.И., Сеньков Р.В., Родченков И.В., Анохин П.М. Анализ эффективности функционирования сложных систем // Автоматизация проектирования. – 1999. – № 1.
15. Сиразетдинов Т.К. Методы решения многокритериальных задач синтеза технических систем. – М.: Машиностроение, 1988. – 156 с.
16. Banker R.D., Charnes A., Cooper W.W. Some models for estimating technical and scale efficiency in Data Envelopment Analysis. Management Science 30/9, 1984.
17. Лескин А.И. Улучшение качества дорожного вязкого нефтяного битума на стадии его производства при снижении температуры окисления: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07. – Волгоград, 2006.
18. Тюкилина П.М. Производство нефтяных дорожных битумов на основе модифицированных утяжеленных гудронов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07. – Уфа, 2015.
19. Евдокимова Н.Г., Лобанов В.В., Хивинцев А.В. Влияние параметров окисления гудронов на долговечность нефтяных битумов // Химия и технология топлив и масел. – 2000.
20. Рябов В.Г., Ширкунов А.С., Кудинов А.В., Нечаев А.Н. и др. Получение качественных дорожных битумов с использованием высоковязких гудронов // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2008.

Статья поступила в редакцию 7 мая 2021 г.

MULTI-CRITERIA ANALYSIS OF ROAD BITUMEN PRODUCTION PROCESSES BY OXIDATION OF REFINED PETROLEUM PRODUCTS

Yu.E. Pleshivtseva, A.V. Kazarinov, M.Yu. Derevyanov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *Based on the DEA method, an approach has been developed for the multivariate analysis of the road bitumen production processes, allowing obtaining integral comparative assessments that ensure the ranking of processes according to various heterogeneous criteria. The main quantitative characteristics, qualitative indicators, and technological parameters of the oxidation processes are selected to form target functions when solving mathematical programming problems. Based on the CCR and Super Efficiency models of the DEA method, the problems of multivariate analysis of the efficiency of road bitumen production processes for the actual values of the characteristics of raw materials and parameters of technological processes were formulated and solved, a comparative analysis of the estimates obtained for 64 bitumen samples was carried out. The results of the studies carried out make it possible to significantly expand the scope of the DEA method application and create on its basis a software package for multivariate analysis and optimization of bitumen production processes by improving the quality of the final product, reducing the resources for its production and reducing the negative impact on the environment.*

Keywords: *Data Envelopment Analysis, multivariate analysis, road bitumen, oil refining, technological process, efficiency.*

REFERENCES

1. On the Concept of National Security of the Russian Federation. Decree of the President of the Russian Federation No. 24 of 10.01.2000 (In Russian).
2. Orlov V.P. Gosudarstvo i nedropol'zovanie // Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie, 2001 (In Russian).
3. Murtazin T.M., Rizvanov T.M., Nigmatullin V.R., Kut'in Yu.A., Telyashev E.G. Operativnoe upravlenie processom kompaundirovaniya bitumov // Neftepererabotka i neftekhimiya. 2006 (In Russian).
4. Vasil'ev A.V., Pimenov A.A. Analiz dinamiki sovremennykh trebovaniy k neftyanym dorozhnym bitumam // XV vsrossijskaya konferenciya "Himiya i inzhenernaya ekologiya" s mezhdunarodnym uchastiem – 2015 (In Russian).
5. Sibgatullina R.I., Abdullin A.I., Emel'yanycheva E.A., Bikmuhametova G.K. Vliyaniye parametrov okisleniya gudronov na svoystva konechnogo bitumnogo materiala. Kineticheskie osobennosti okisleniya neftyanykh ostatkov do bituma // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta – 2016 (In Russian).
6. Rudenskaya I.M. Neftyanye bitumy. M.: Vysshaya shkola. MADI, 1964 (In Russian).
7. Proizvodstvo okislennykh bitumov: Metodicheskoe posobie, Kazan: Kazanskiy federal'nyy universitet, 2013 (In Russian).
8. Bannov P.G. Processy pererabotki nefii. M.: CNIITeneftkhim, 2001.
9. Gun R.B. Neftyanye bitumy. M.: Himiya, 1973 (In Russian).
10. Tanashev S.T., Umbetov U.U., Toktagulova U.S., Dildabaeva M.S. Vozmozhnost' prognozirovaniya optimal'noy tekhnologii proizvodstva okislennykh bitumov po himicheskomu sostavu pererabatyvaemoy nefii. Shymkent, Kazahstan (In Russian).
11. Pazhitova N.P., Potapova T.V. Issledovanie svoystv bitumov, primenyaemykh v dorozhnom stroitel'stve. M.: Trudy SoyuzDorNII, 1970 (In Russian).

Yuliya E. Pleshivtseva (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Artem V. Kazarinov, Graduate Student.

Maksim Yu. Derevyanov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

12. Thierry Post, Jaap Spronk. Performance benchmarking using interactive data envelopment analysis. *Eur. J. Opl. Res.* 115. 1999.
13. *Norio Hibiki, Toshiyuki Sueyoshi.* DEA sensitive analysis by changing a reference set: regional contribution to Japanese industrial development. *Omega, Int. J. Mgmt. Sci.* 27. 1999.
14. *Krivozhko V.E., Propoj A.I., Sen'kov R.V., Rodchenkov I.V., Anohin P.M.* Analiz effektivnosti funkcionirovaniya slozhnykh sistem. *Avtomatizatsiya proektirovaniya.* 1999 (In Russian).
15. Sirazetdinov T.K. *Metody resheniya mnogokriterial'nykh zadach sinteza tekhnicheskikh sistem.* M.: Mashinostroenie, 1988 (In Russian).
16. Banker R.D., Charnes A., Cooper W.W. Some models for estimating technical and scale efficiency in Data Envelopment Analysis. *Management Science* 30/9, 1984.
17. Leskin A.I. Uluchshenie kachestva dorozhnogo vyazkogo neftyanogo bituma na stadii ego proizvodstva pri snizhenii temperatury okisleniya: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.17.07. – Volgograd, 2006 (In Russian).
18. Tyukilina P.M. Proizvodstvo neftyanykh dorozhnykh bitumov na osnove modifitsirovannykh utyazhennykh gudronov (In Russian).
19. Evdokimova N.G., Lobanov V.V., Hivincev A.V. Vliyanie parametrov okisleniya gudronov na dolgovechnost' neftyanykh bitumov. *Himiya i tekhnologiya topliv i masel,* 2000 (In Russian).
20. Ryabov V.G., Shirkunov A.S., Kudinov A.V., Nechaev A.N. i dr. Poluchenie kachestvennykh dorozhnykh bitumov s ispol'zovaniem vysokovyazkikh gudronov. *Neftepererabotka i neftekhimiya.* 2008.