

УДК 665.7

## ОЦЕНКА РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА ТЯЖЕЛЫХ НЕФТЯНЫХ ОСТАТКОВ НА ОСНОВЕ DEA-МЕТОДА

© 2019 г. П. М. Тюкилина<sup>1</sup>, П. Е. Красников<sup>1, \*</sup>, М. Ю. Деревянов<sup>1</sup>,  
А. А. Пименов<sup>1</sup>, Ю. Э. Плешивцева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный технический университет, Самара, 445000 Россия

\*E-mail: krasnikovpe@gmail.com

Поступила в редакцию 21.11.2018 г.

После доработки 30.06.2019 г.

Принята к публикации 02.07.2019 г.

На основе DEA-метода (Data Envelopment Analysis) – эффективного инструмента обработки больших массивов данных, проведена оценка ресурсного потенциала тяжелых нефтяных остатков для получения высококачественного дорожного битума. Применяемый подход позволил определить границу ресурсного потенциала тяжелых нефтяных остатков, то есть прогнозировать качество битума при любой комбинации состава нефтяного остаточного сырья, и получить информацию о необходимости внесения корректировок в компонентный состав смесей для получения продукта с заданными свойствами.

На основе выборки 99 экспериментов показано, что наибольшая эффективность в части достижения нормативных характеристик битумов достигается при введении в высоковязкий гудрон тяжелого вакуумного газойля и мазута. Показана принципиальная возможность эффективного использования в качестве модифицирующих компонентов асфальта деасфальтизации и затемненной вакуумной фракции, оптимальные концентрации которых в гудроне составили 20 и 40 мас. % соответственно.

**Ключевые слова:** метод анализа среды функционирования (DEA-метод), тяжелые нефтяные остатки, дорожный битум, модификатор, ресурсный потенциал, физико-химические свойства битума, групповой химический состав

**DOI:** 10.1134/S0028242119060145

Переработка побочных продуктов нефтеперерабатывающей отрасли с целью использования их ресурсного потенциала – процесс, в котором отход или остаток приобретает полезные свойства и становится продуктом или сырьем для производства других продуктов (вторичным сырьем).

Если в результате переработки отход приобретает полезные потребительские свойства, или в результате анализа свойств и сопоставления их с существующей информацией о сырьевом рынке выявляются потребительские свойства отхода, он становится продукцией. Этот тезис, являющийся основой концепции ресурсосбережения при утилизации любых отходов, положен в основу понятия ресурсного потенциала, под которым понимается комплексный количественный показатель возможности их эффективной вторичной переработки для получения высококачественного дорожного битума [1].

Вместе с этим, в России существенной проблемой является обеспечение дорожного хозяйства высококачественными нефтяными вяжущими материалами. Этой проблеме в последнее время

уделяется большое внимание на государственном уровне. Сформированы приоритетные направления развития транспортной системы РФ на период до 2030 г. В 2017 г. Правительство РФ утвердило переход на новые межремонтные сроки эксплуатации федеральных трасс – до 12 лет (с 4–6) по текущему ремонту и до 24 лет (с 12) по капитальному ремонту. Указанный курс государства на модернизацию автодорог повлек изменение нормативных требований к битумным вяжущим материалам. Введен новый межгосударственный стандарт ГОСТ 33133 “Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие”, что потребовало от производства и прикладной науки поиска новых технологических решений и подходов к анализу ресурсного потенциала тяжелых нефтяных остатков (ТНО) [2].

Проблему квалифицированного и рационального использования ТНО позволяет решить подход, основанный на построении так называемой границы эффективности [3]. Для оценки применяются различные методы, в том числе метод Data Envelopment Analysis (DEA), в основе которого



Рис. 1. Модель  $n$ -го образца ТНО для оценки его сравнительного ресурсного потенциала.

лежит линейное программирование [4, 5]. В настоящее время общепринятого русского эквивалента английскому названию метода нет, однако предлагается такой вариант как “анализ среды функционирования”. Эта “среда функционирования” задает границу производственных возможностей, то есть максимально возможный выход продукции при любой комбинации ресурсов. Метод DEA, предложенный в 1978 г. американскими учеными A. Charnes, W.W. Cooper и E. Rhodes, которые основывались на идеях M.J. Farrell, постоянно развивается и совершенствуется.

Целью работы является исследование возможности повышения эффективности использования тяжелых нефтяных остатков — гудронов и их смесей с нецелевыми продуктами нефтепереработки, получаемых в условиях глубокой переработки нефти, посредством выбора наиболее оптимальных технологических решений с позиции оценки и оптимизации их ресурсного потенциала для переработки в дорожный битум.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Под ресурсным потенциалом ТНО понимается комплексная оценка совокупности его свойств и характеристик, отражающая сравнительную ценность, как продукта (битума), так и сырья (ТНО) для переработки по соответствующей технологии (см. рис. 1–5).

Суть подхода состоит в определении границы максимального ресурсного потенциала оцениваемых объектов по физико-химическим свойствам образцов ТНО анализируемой выборки. Каждому ТНО или смеси ТНО соответствует точка в многомерном пространстве “компоненты — ресурсный потенциал”, полученная в результате решения соответствующей оптимизационной задачи. Оценка сравнительной ресурсного потенциала группы из  $N$  объектов ТНО, проводится в условиях наличия информации о количественном и качественном компонентном составе каждого  $n$ -го образца  $n = \overline{1, N}$ . На основе проведенной оценки могут быть приняты решения об эффективности использования каждого рассматриваемого образца ТНО в качестве сырьевых ресурсов для переработки в дорожный битум.

DEA-метод позволяет определить наиболее эффективные с позиций управления ТНО объек-

ты из множества  $N$ ,  $n = \overline{1, N}$  рассматриваемых образцов в анализируемой группе и построить соответствующую им границу эффективности, при этом определяется и мера неэффективности всех остальных объектов по сравнению с наиболее эффективными.

Для формализации описания анализируемой группы образцов записывается набор  $k$  физических, химических и технологических параметров  $(c_j)$ ,  $j = \overline{1, k}$ , с достаточной для оценки ресурсного потенциала  $R$  степенью полноты характеризующих компонентный состав нефтяных остатков, в виде матрицы-строки:

$$C = (c_1, \dots, c_j, \dots, c_k). \quad (1)$$

Тогда, в соответствии с (1), каждый  $n$ -ый образец ( $n = \overline{1, N}$ ) представляется набором  $C_n = (c_{nj})$ ,  $j = \overline{1, k}$  значений физических, химических и технологических параметров, характеризующих данный образец.

В составе образцов можно выделить элементы (свойства), характеризующие непригодные для использования по целевому назначению, химические и физические параметры, отрицательно влияющие на ресурсную ценность остатков анализируемой группы. Набор таких элементов может быть представлен в виде множества  $X = (x_i)$ ,  $i = \overline{1, m_{\text{вх}}}$ ,  $m_{\text{вх}} < k$  входных параметров модели объектов ТНО, где  $m_{\text{вх}}$  — число входных параметров. Таким образом, выбор входных величин  $x_i$ ,  $i = \overline{1, m_{\text{вх}}}$  осуществляется так, чтобы уменьшение каждой из них приводило к повышению величины ресурсного потенциала  $R$ , т.е., чтобы выполнялись условия:

$$\frac{\partial R(X)}{\partial x_i} < 0, i = \overline{1, m_{\text{вх}}}. \quad (2)$$

Аналогично в составе образцов из выборки могут быть выделены элементы, характеризующие компоненты, пригодные для использования, и прочие химические и физические параметры, характеризующие элементы, положительно влияющие на ресурсный потенциал ТНО анализируемой группы. Набор таких параметров может быть представлен в виде множества  $Y = (y_j)$ ,  $j = \overline{1, m_{\text{вых}}}$ ,  $m_{\text{вх}} + m_{\text{вых}} \leq k$  выходных параметров модели ТНО, где  $m_{\text{вых}}$  — число выходных параметров.

Выбор выходных величин  $y_j$ ,  $j = \overline{1, m_{\text{вых}}}$  осуществляется таким образом, чтобы каждая из них характеризовала положительный фактор при оценке ресурсного потенциала  $R$  исследуемых объектов, т.е. чтобы выполнялись условия:

$$\frac{\partial R(Y)}{\partial y_j} > 0, j = \overline{1, m_{\text{ВЫХ}}}. \quad (3)$$

В общем случае, помимо элементов компонентного состава (1), в качестве параметров, входящих в  $X$  и  $Y$ , могут рассматриваться величины, измеряемые в разных физических единицах и имеющие различный физический смысл, удовлетворяющие условиям уравнений (2) или (3). В качестве таких критериев могут использоваться показатели химического состава, реологических и других физико-химических свойств, энергетические и технологические параметры технологического процесса и пр.

Модель  $n$ -го образца ТНО может быть представлена в виде блока, имеющего на входе множество  $X_n = (x_{ni}), i = \overline{1, m_{\text{ВХ}}}$  соответствующих данному образцу параметров, отрицательно влияющих на ресурсную ценность, и на выходе – множество  $Y_n = (y_{nj}), j = \overline{1, m_{\text{ВЫХ}}}$ , соответствующих данному образцу факторов, положительно влияющих на ресурсный потенциал (рис. 1). Множество указанных величин представляет достаточно полную и адекватную характеристику  $n$ -го образца.

Структура комплексного показателя ресурсного потенциала  $R_n, n = \overline{1, N}$  каждого анализируемого образца формируется на основе  $m_{\text{ВХ}}$  значений входных величин  $x_{ni}, i = \overline{1, m_{\text{ВХ}}}$  и  $m_{\text{ВЫХ}}$  выходных величин  $y_{nj}, j = \overline{1, m_{\text{ВЫХ}}}$  как отношение некоторого обобщенного (интегрального) выходного параметра к обобщенному входному параметру; при этом в качестве обобщенного выхода (входа) рассчитывается взвешенная сумма по всем составляющим множества выхода (входа):

$$R_n = \frac{\sum_{j=1}^{m_{\text{ВЫХ}}} u_{nj} y_{nj}}{\sum_{i=1}^{m_{\text{ВХ}}} v_{ni} x_{ni}}; u_{nj} \geq 0, j = \overline{1, m_{\text{ВЫХ}}}; \quad (4)$$

$$v_{ni} \geq 0, i = \overline{1, m_{\text{ВХ}}}; n = \overline{1, N}.$$

В (4)  $u_{nj}, j = \overline{1, m_{\text{ВЫХ}}}$  – неотрицательные весовые коэффициенты, характеризующие относительный вклад каждого из выходных факторов  $y_{nj}, j = \overline{1, m_{\text{ВЫХ}}}$  в комплексный показатель ресурсного потенциала  $R_n$ , а, соответственно,  $v_{ni}, i = \overline{1, m_{\text{ВЫХ}}}$  – неотрицательные весовые коэффициенты при входных величинах  $x_{ni}, i = \overline{1, m_{\text{ВХ}}}$ . Весовые коэффициенты  $u_{nj}, j = \overline{1, m_{\text{ВЫХ}}}$  и  $v_{ni}, i = \overline{1, m_{\text{ВЫХ}}}$  в (3) являются неизвестными и различными для всех  $N$  исследуемых образцов.

Комплексные показатели ресурсного потенциала  $R_n, n = \overline{1, N}$  для  $N$  исследуемых образцов определяли по соотношению (4), считая, что их значения конечны и распределены в числовом интервале от 0 до 1.

Задача оценки ресурсного потенциала сводится к решению оптимизационной задачи на максимум целевой функции, определяемой по (4) для каждого образца, а область  $G$  изменения значений весовых коэффициентов  $(u_{nj}, v_{ni}) \in G, j = \overline{1, m_{\text{ВЫХ}}}, i = \overline{1, m_{\text{ВХ}}}, n = \overline{1, N}$  можно определить из системы неравенств  $R_n \leq 1, n = \overline{1, N}$  при заданных значениях элементов входных  $X_n = (x_{ni}), i = \overline{1, m_{\text{ВХ}}}, n = \overline{1, N}$  и выходных  $Y_n = (y_{nj}), j = \overline{1, m_{\text{ВЫХ}}}, n = \overline{1, N}$  множеств.

Таким образом, общая постановка задачи сравнительной оценки ресурсного потенциала множества  $N$  образцов ТНО и их смесей с модификатором может быть записана следующим образом:

$$R_n(X_n, Y_n) = \frac{\sum_{j=1}^{m_{\text{ВЫХ}}} u_{nj} y_{nj}}{\sum_{i=1}^{m_{\text{ВХ}}} v_{ni} x_{ni}} \rightarrow \max_{(U_n, V_n) \in G} \forall n = 1, \dots, N; \quad (5)$$

$$\text{при } \frac{\sum_{j=1}^{m_{\text{ВЫХ}}} u_{nj} y_{nj}}{\sum_{i=1}^{m_{\text{ВХ}}} v_{ni} x_{ni}} \leq 1 \quad \forall n = 1, \dots, N; \quad (6)$$

$$u_{nj} \geq 0, j = \overline{1, m_{\text{ВЫХ}}}; v_{ni} \geq 0, i = \overline{1, m_{\text{ВХ}}},$$

где  $U_n = (u_{nj}), j = \overline{1, m_{\text{ВЫХ}}}, V_n = (v_{ni}), i = \overline{1, m_{\text{ВХ}}}$  множества весовых коэффициентов.

В качестве компонентов – модификаторов ТНО рассматривались дистиллятные фракции вакуумной перегонки мазута, ЗВФ и ТВГ, асфальт деасфальтизации гудрона, мазут. Образцам сырья, ТНО и их смесям с модификаторами, определяли условную вязкость при 80°C (ВУ80) по ГОСТ 11503, а также групповой химический состав, основанный на хроматографическом анализе с градиентным вытеснением групп соединений (парафино-нафтеновые, ароматические, смолы, асфальтены) на жидкостном хроматографе “Градиент-М”. Смесей ТНО окисляли в лабораторном окислительном реакторе периодического действия при различных параметрах температуры и расхода воздуха с получением образцов дорожных битумов. В качестве критериев качества полученных продуктов взяты показатели физико-химических свойств битумов после термоокислительного старения в тонкой пленке по ГОСТ 33140: растяжимость при 25°C (Д25, см),

**Таблица 1.** Расчет значений DEA оценок P и RP для двух групп параметров

Группа параметров	Параметр	Характеристика гудрона или смеси гудрона с модификатором					Параметры окисления			Физико-механические свойства битума после старения по ГОСТ 33140			
		содержание, мас. %			физико-механические свойства								
		смола	асфальтенов	масел	ВУ80, с	КиШ, °С	T, С	воздух, м <sup>3</sup> /ч	время, ч	ΔКиШ, °С	Ост. П25, %	Д25, см	T <sub>хр</sub>  , °С
Референсные значения		17–38	3.5–6.5	65–73	30–80	22–27	–	–	–	≤7	≥65	≥40	≥13
1	Rphys	–	–	–	X	X	–	–	–	Y	Y	Y	Y
	RPphys	–	–	–	X	X	X	X	X	–	–	–	–
2	Pchem	X	X	X	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	RPchem	X	X	X	–	–	X	X	X	–	–	–	–

изменение температуры размягчения (ΔКиШ, °С), температура хрупкости ( $|T_{хр}|$ , °С), остаточная пенетрация (Ост. П25, %). Как известно [8], наиболее интенсивное старение вяжущего происходит при его смешении с каменным материалом в процессе приготовления асфальтобетонной смеси под воздействием высоких температур и воздуха.

Расчет значений DEA оценок P и RP проводится для двух групп параметров, см. табл. 1:

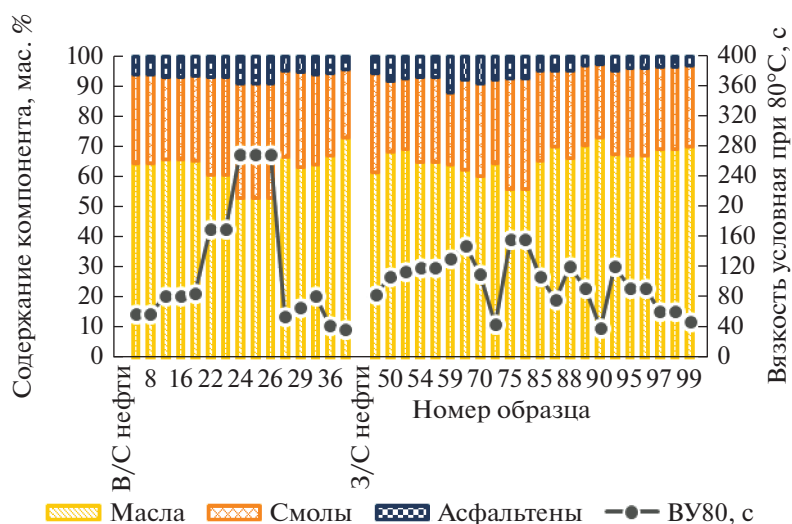
– группа 1 (физико-химические свойства) – Rphys отражает влияние физико-химических свойств ТНО (входы X) на характеристики составленных по ГОСТ 33140 битумов (выходы Y); RPphys – дополнительно учитывает параметры технологического процесса окисления: темпера-

туру, расход воздуха и продолжительность окисления (все учтены во входах X);

– группа 2 (групповой химический состав) создана для поиска взаимосвязей между групповым химическим составом ТНО (входы X для Pchem) и с учетом тех же технологических параметров (дополнительных 3 входа X для RPchem) и свойствами старения битумов (выходы Y).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный анализ группового химического состава и вязкости ТНО различного генезиса, из восточносибирских (Ачинский НПЗ, Ангарская НХК) и западносибирских нефтей (Сызранский, Новокуйбышевский, Саратовский НПЗ,

**Рис. 2.** Групповой химический состав и вязкость ТНО.

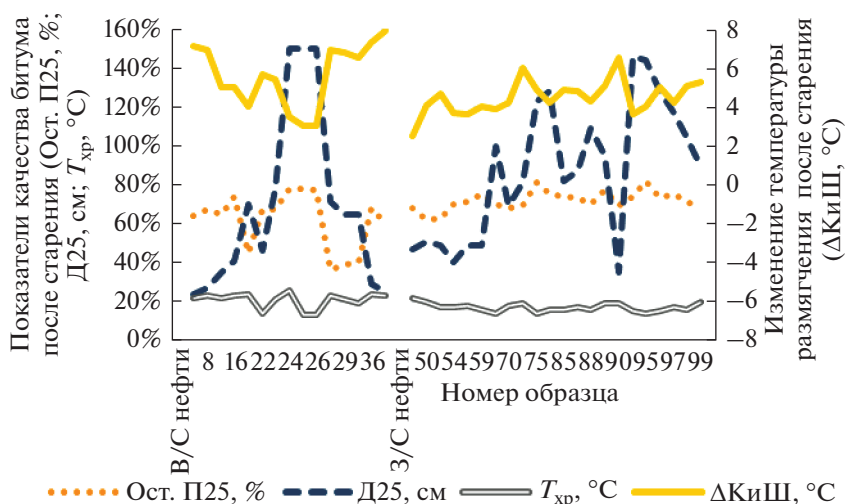


Рис. 3. Результаты анализа физико-химических свойств образцов битумов после старения.

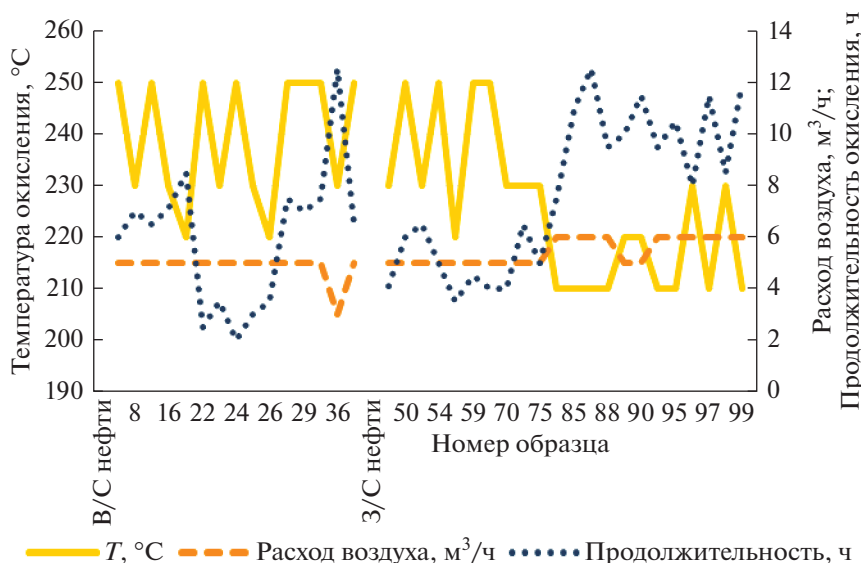


Рис. 4. Параметры технологического процесса окисления ТНО и их смесей.

Рязанская НХК) представлены на рис. 2–5. Вязкость ТНО анализируемой выборки варьируется в пределах от 30 до 270 с.

Выборка из результатов расчетов  $R$  и  $RP$  для 99 экспериментов по окислению гудронов и их смесей с модификаторами представлена на рис. 5. Анализ полученных данных показал, что предложенная методика эффективна для сравнения больших объемов различных параметров гудронов и битумов.

Полученные значения  $R$  и  $RP$  (при их сопоставительной оценке внутри массива) согласуются с известными закономерностями “свойства и компонентный состав гудрона—условия окисления—свойства и компонентный состав битума” [6, 7].

Например,  $R7_{phys} = 0.956$ , а  $R8_{phys} = 1.000$  (рис. 5) (здесь и далее индексы соответствуют лабораторному номеру эксперимента): для 8-го образца все свойства устойчивости к старению выше, чем у № 7 (рис. 3). В то же время  $RP7_{phys} = RP8_{phys} = 1.000$  (рис. 5), что свидетельствует о положительном влиянии снижения температуры окисления на  $20^\circ\text{C}$  на величину  $RP$  (рис. 3).

Эксперименты № 24–26 с высоковязкими (270 с) и высокосмолистыми (38 мас. %) гудронами (рис. 2) показали их низкую ресурсную ценность  $P24-26_{phys} = 0.145$ ,  $P24-26_{chem} = 0.077-0.088$  (рис. 5), однако полученные значения  $RP24-26_{phys} = RP24-26_{chem} = 1.000$  свидетельствуют о достижении нормативного качества продукта по

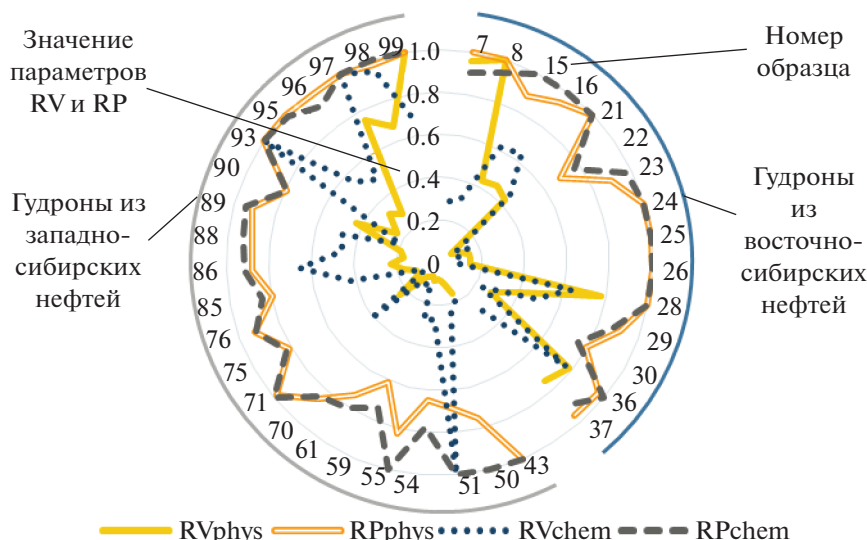


Рис. 5. Результаты расчетов Р и RP для 99 экспериментов по окислению гудронов и их смесей с модификаторами.

характеристикам старения при трех вариантах условий ведения процесса: 250°C, 5 м<sup>3</sup>/ч, 2 ч; 230°C, 5 м<sup>3</sup>/ч, 3 ч; 220°C, 5 м<sup>3</sup>/ч, 3.5 ч.

Модифицирование гудронов восточносибирских нефтей асфальтом деасфальтизации (опыты № 28–30) и ЗВФ (опыты № 36–37) показали принципиальную возможность эффективного использования этих компонентов, оптимальные концентрации которых в гудроне составили: для асфальта деасфальтизации – 20 мас. % (используется в качестве модификатора маловязкого гудрона), для ЗВФ – 40 мас. % (модификатор высоковязкого гудрона).

Также для гудронов западносибирских нефтей наибольшая эффективность в части достижения нормативных характеристик старения битумов достигнута при следующих концентрациях модификаторов в высоковязком гудроне: 10 мас. % ТВГ для получения смеси ТНО вязкостью условной 76 с, 7 мас. % ТВГ для получения смеси 92 с, 6 мас. % мазута для смеси 121 с, 20 мас. % мазута для смеси 61 с, 25 мас. % мазута для смеси 48 с.

Таким образом, разработанная методика оценки ресурсного потенциала квалифицированной переработки тяжелых нефтяных остатков позволяет сравнивать многомерные массивы экспериментальных данных и обоснованно выбирать оптимальные с позиций многопараметрической оптимизации варианты использования в качестве сырья для производства нефтяных дорожных битумов. При этом ключевым фактором является корректный выбор параметров входа  $X$  (свойства ТНО) и выхода  $Y$  (свойства битума).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе адаптации ДЕА-анализа разработана методика оценки ресурсного потенциала тяжелых нефтяных остатков – гудронов, модифицированных нецелевыми компонентами и полупродуктами нефтепереработки.

Результаты исследований по окислению гудронов различного генезиса, восточносибирских и западносибирских нефтей, определению влияния группового химического состава сырья, продуктов и параметров процесса окисления на физико-химические свойства битумов показали, что:

- модифицирование гудронов восточносибирских нефтей асфальтом деасфальтизации и ЗВФ целесообразно; их оптимальные концентрации составили: для маловязкого гудрона (15–20 с) – 20 мас. % асфальта деасфальтизации; для высоковязкого гудрона (270 с) – 40 мас. % затемненного вакуумного газойля;

- для гудронов западносибирских нефтей наибольшая эффективность в части достижения нормативных характеристик старения битумов достигнута при следующих концентрациях модификаторов: 10 мас. % ТВГ для получения смеси ТНО вязкостью условной 76 с, 7 мас. % ТВГ для получения смеси 92 с, 6 мас. % мазута для смеси 121 с, 20 мас. % мазута для смеси 61 с, 25 мас. % мазута для смеси 48 с.

Полученные в результате проведенного анализа данные легли в основу рецептур производства нефтяных дорожных битумов, удовлетворяющих требованиям нового межгосударственного стандарта ГОСТ 33133, для нефтеперерабатывающих предприятий топливного и топливно-масляного профиля.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проектная часть госзадания, проект № 10.3260.2017/4.6).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тюкилина Полина Михайловна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3064-0047>

Красников Павел Евгеньевич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1241-3454>

Деревянов Максим Юрьевич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3236-7838>

Пименов Андрей Александрович, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0858-6961>

Плещивцева Юлия Эдгаровна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5344-1049>

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плещивцева Ю.Э., Деревянов М.Ю., Каширских Д.В., Пименов А.А., Керов А.В., Тян В.К. // Нефтяное хозяйство. 2018. № 8. С. 104.
2. Тюкилина П.М., Мельников В.Н., Тыщенко В.А., Ермаков В.В., Пименов А.А. // Химия и технология топлив и масел. 2015. № 5. С. 13.
3. Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K. Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000. 318 p.
4. Чернышова Г.Ю., Ковалев Р.Н. // Фундаментальные исследования. 2017. № 8 (ч. 2). С. 453.
5. Лиссунца А.Н., Бабичева Т.С. // Discussion Paper. Institute of Agricultural Development in Central and Eastern Europe. № 50. 2003. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:3:2-23263>.
6. Behzadfar Eh., Hatzikiriakos S.G. // Fuel. 2014. № 116. P. 578.
7. Krasnikov P.E., Gavrilov M.M., Efimenko K.A., Egorov A.G., Nikitchenko N.V., Tyukilina P.M., Pimenov A.A., Akhmadova Kh.Kh., Makhmudova L.Sh. // Petrol. Chemistry. 2018. V. 58. № 8. P. 646.
8. Гуреев А.А. Нефтяные вяжущие материалы. М.: Недра, 2018. 155 с.