

Ф. Р. Муртазин (к.т.н., доц.)^а, Н. Г. Евдокимова (д.т.н., проф.)^а,
Т. М. Левина (к.т.н., доц.)^б, И. Г. Ибрагимов (д.т.н., проф.)^в, Г. М. Сидоров (д.т.н., проф.)^г

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ НЕФТЯНЫХ БИТУМОВ И ПОДБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Уфимский государственный нефтяной технический университет,
^а кафедра «Химико-технологические процессы», ^б кафедра «Информационные технологии»
^в кафедра «Технология металлов в нефтегазовом машиностроении»,
^г кафедра «Технология нефти и газа»
450064, г. Уфа, ул. Космонавтов 1, e-mail: slvvuz@yandex.ru

F. R. Murtazin, N. G. Evdokimova, T. M. Levina, I. G. Ibragimov, G. M. Sidorov
**FORECASTING THE PROPERTIES OF OIL BITUMENS
AND SELECTION OF OPTIMAL TECHNOLOGICAL
PARAMETERS BASED ON MATHEMATICAL MODELING**

Ufa State Petroleum Technological University
1, Kosmonavtov Str., 450064, Ufa, Russia; email: slvvuz@yandex.ru

Разработаны математические модели для прогнозирования свойств битумных материалов и подбора оптимальных технологических параметров процесса окисления сырья битумного производства. Был проведен сбор и обработка статистических данных по действующей установке производства битумов. Для построения математической модели был выбран метод множественной линейной регрессии. Апробация модели для определения содержания кислорода в газах окисления показала возможность подбора параметров процесса окисления и устранить нарушения норм по этому показателю, снизить риски аварийных ситуаций и обеспечить безопасную эксплуатацию оборудования.

Ключевые слова: битум; корреляционно-регрессионный анализ; математическое моделирование; окисление; параметры процесса; пенетрация; прогнозирование; содержание кислорода в газах окисления; температура размягчения

Современные темпы строительства в нашей стране требуют повышения качества устройства, ремонта и реконструкции автомобильных дорог, а также производства битумных материалов, которые соответствовали бы условиям эксплуатации асфальтобетонных покрытий в различных климатических регионах¹.

В России основным способом производства дорожных битумов является процесс окисления

The paper develops mathematical models for predicting the properties of bitumen materials and selecting optimal technological parameters of the oxidation process of bitumen production raw materials. Statistical data on the current bitumen production plant was collected and processed. The method of multiple linear regression was chosen to build a mathematical model. Testing of the model for determining the oxygen content in oxidation gases has shown that it is possible to select the parameters of the oxidation process and eliminate violations of standards for this indicator, reduce the risks of accidents and ensure safe operation of equipment.

Key words: bitumen; correlation and regression analysis; mathematical modeling; oxidation; process parameters; penetration; forecasting; oxygen content in oxidation gases; softening temperature

гудрона кислородом воздуха в аппаратах колонного типа. Протекающие в процессе окисления химические реакции с компонентами сырья зависят от многих факторов и в настоящее время недостаточно изучены. Скорости различных реакций при окислении сырья будут в значительной степени зависеть от параметров процесса и качества сырья, которое в промышленных условиях очень часто меняется, что значительно влияет на качественные характеристики готовой продукции.

Дата поступления 04.09.25

Многие свойства битумов взаимосвязаны через сложные зависимости, и сочетание этих параметров характеризует особенности дисперсной структуры продукта, а также его поведение в условиях эксплуатации².

В связи со сложностью прогнозирования качественных показателей производимого битума на действующих битумных установках математическое моделирование процесса позволит проводить подбор параметров ведения процесса и прогнозировать физико-химические свойства битума³⁻⁵.

Для прогнозирования свойств битумов используют эмпирические испытания и математическое моделирование, которое основано на получении регрессионных уравнений и их систем на основе абстрактных зависимостей между параметрами производства, показателями качества сырья и получаемого продукта⁶⁻⁸.

В настоящее время для поиска оптимальных параметров технологического процесса окисления при производстве битумов создание математической модели позволит обеспечить сокращение расходов и увеличить производительность. Заблаговременное прогнозирование и расчет характеристик битумных материалов, в зависимости от технологических параметров производства и параметров сырья, сокращение времени подбора необходимых параметров технологического процесса производства битумных материалов, при изменении качества сырья, позволит сократить итерации подбора производственных параметров и

оптимизировать режим работы колонн окисления, исключить нарушения норм по содержанию кислорода в газах окисления, а также позволит снизить риски инцидентов, аварийных ситуаций и остановки объекта, обеспечить безопасную эксплуатацию оборудования.

Таким образом, целью работы стала разработка модели для прогнозирования свойств битумных материалов и подбора оптимальных технологических параметров процесса снижения содержания кислорода в газах окислений в соответствии с нормируемыми значениями.

Материалы и методы

Сбор и обработка статистических данных проведены по действующей установке производства битумов, технологическая схема которой представлена на рис. 1. Данная установка работает по технологии «окисление-компаундирование» и производит нефтяные битумы дорожных марок.

На основе данных режимных листов собраны статистические данные блока окисления установки, характеризующие независимые переменные x :

- 1) качество гудрона (смесового сырья):
 - температура размягчения, °С;
 - вязкость условная при 80 °С, с;
 - температура вспышки, °С;
- 2) уровень в колоннах окисления:
 - уровень в колонне окисления К-1, мм;
 - уровень в колонне окисления К-2, мм;

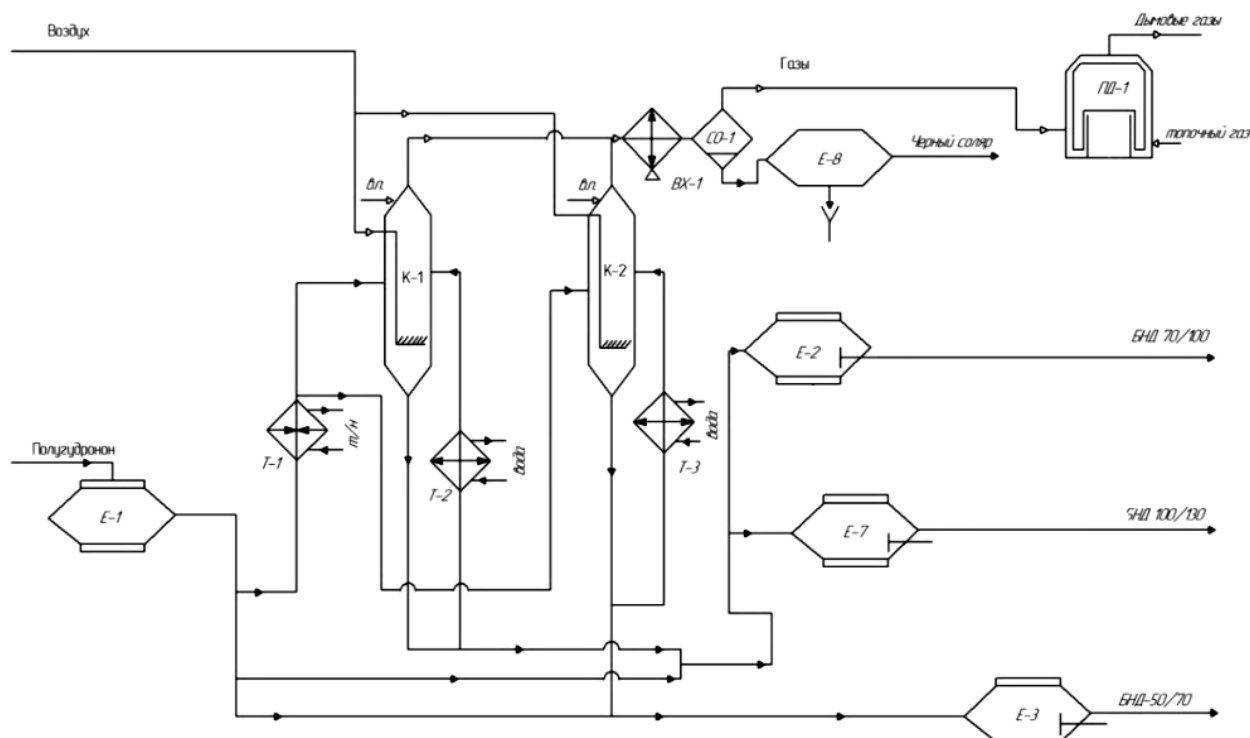


Рис. 1. Схема установки производства битумов: E-1–E-8 – резервуары; ПД-1 – печь дожигания; К-1, К-2 – окислительные колонны; T-1–T-3 – теплообменники; ВХ-1 – воздушный холодильник; СО-1 – сепаратор отгона

3) параметры процесса окисления битума для К-1 и К-2:

- расход гудрона на окисление, т/ч;
- температура окисления, °С;
- температура воздуха, °С;
- расход воздуха, м³/ч.

Собраны статистические данные характеризующие зависимые переменные у:

- глубина проникновения иглы при 25 °С битума после К-1 и К-2 (I), мм;
- температура размягчения по кольцу и шару битума после К-1 и К-2 ($T_{разб}$), °С;
- изменение температуры размягчения после старения битума на выходе К-1 и К-2 (DT), °С.
- содержание кислорода в газах окисления колонны К-1 и К-2 (C_{O_2}), % об.

Важным этапом была подготовка данных действующей битумной установки, включающая обработку пропущенных значений, удаление нерелевантных значений и выбросов (значения, слишком сильно отклоняющихся от остальных), очистку данных от шумов и их масштабирование, чтобы все переменные были в сопоставимых единицах. После обработки статических данных для модели по прогнозированию содержания кислорода в газах окисления осталось 10705 наблюдений, качественных показателей окисленного битума после колонн К-1 и К-2 – 905 наблюдений.

В табл. 1 приведена описательная статистика. Анализ данных таблицы показывает идентичную работу колонн К-1 и К-2. Отличия наблюдаются в значениях расходов сырья, воздуха и соответственно времени окисления, это позволяет сделать вывод, что параметры можно описать одной моделью с учетом конструкционных размеров.

Установлено, что температуры, измеряемые в различных участках колонн, линейно зависимы, и множественные коэффициенты корреляции R^2 составляют не менее 0.997 (рис. 2).

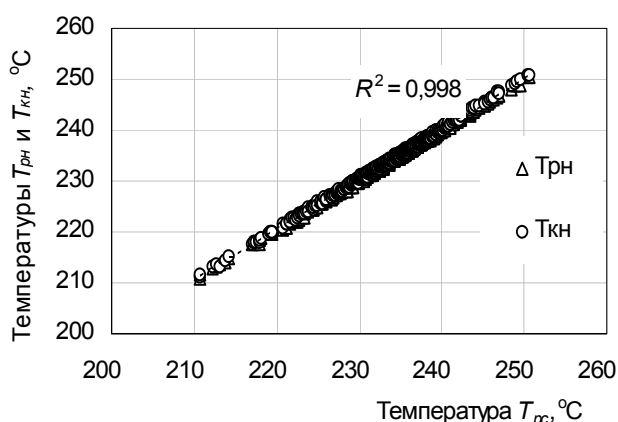


Рис. 2. Зависимость температур низа колонны $T_{рн}$ и $T_{кн}$ от температуры в зоне реакции (середина) колонны $T_{рс}$

Поэтому в модель была включена только одна температура – температура в середине реакционной зоне $T_{рс}$, влияющая на интенсивность процесса окисления. Для построения математической модели был выбран метод множественной линейной регрессии, т.к. он подходит для более сложных взаимосвязей.

Результаты и их обсуждение

Модель регрессии для прогнозирования содержания кислорода (C_{O_2}) в уходящих газах окисления имеет вид:

$$C_{O_2} = 23.94 - 0.5746F_c + 0.00178F_B - 0.161T_{рс} + 0.00195L + 0.0182T_B - 0.194t_{ок}, \quad (1)$$

где F_c – расход сырья (полугудрона) в колонну, т/ч;

F_B – расход воздуха в колонну, м³/ч;

$T_{рс}$ – температура зоны реакции (середина) колонны, °С;

L – уровень от нижнего сварного шва цилиндрической части, мм;

T_B – температура воздуха, °С;

$$t_{ок} = \frac{3.14D^2}{4} \cdot \frac{L}{1000F_c} \cdot \frac{1000}{1000.9} - \text{время окисления, ч;}$$

D – диаметр колонны, м.

Проверку значимости модели проводили на основании показателей тесноты связи между наблюдаемыми и расчетными значениями C_{O_2} с помощью множественного коэффициента корреляции R^2 . Чем более близок множественный коэффициент корреляции к единице, тем лучше данная модель описывает фактические данные. Для проверки значимости уравнения регрессии применили критерий Фишера.

Коэффициент множественной корреляции R^2 получился равным 0.42, что позволило рассчитать значение критерия Фишера по формуле:

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-m-1}{m} = \frac{0.42}{1-0.42} \cdot \frac{10703-6-1}{6} = 1286, \quad (2)$$

где $n = 10661$ – количество наблюдений;

$m = 6$ – количество факторов.

Для установления адекватности полученного уравнения регрессии сравнили расчетное значение с критическим значением критерия Фишера. Критическое значения критерия Фишера $F_{кр}(6.10661) = 2.1$, где $F > F_{кр}(6.10661)$, следовательно, регрессионная модель адекватно описывает экспериментальные данные.

В табл. 2 представлены итоги регрессии для зависимой переменной – концентрации кислоро-

Описательная статистика

Параметр	Колонна	Кол-во наблюдений	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Стандартное отклонение
Расход сырья (гудрона) F_c , т/ч	K-1+ K-2	1052	11.3	2	20	5.54
	K-1	586	15.7	2	20	3.03
	K-2	466	5.6	2.29	7.07	0.93
Расход воздуха $F_{\text{в}}$, м ³ /ч	K-1+ K-2	1052	1611	109	3403	912
	K-1	586	2328	288.5	3403	548
	K-2	466	710	109	1515	202
$CP = F_{\text{в}} / F_c$	K-1+ K-2	1052	137.7	15.83	226.6	21.8
	K-1	586	147.4	99.37	189.1	15.2
	K-2	466	125.4	15.83	226.6	22.7
Температура верха колонны $T_{\text{вс}}$, °C	K-1+ K-2	1052	159.8	105	201.3	20.4
	K-1	586	153.3	105	201.3	22.7
	K-2	466	167.9	115	196.8	13.1
Температура зоны реакции (верх) колонны $T_{\text{рв}}$, °C	K-1+ K-2	1052	159.8	105.0	201.3	20.4
	K-1	586	153.3	105.0	201.3	22.7
	K-2	466	167.9	115.2	196.8	13.1
Температура зоны реакции (середина) колонны $T_{\text{рс}}$, °C	K-1+ K-2	1052	231.8	195.7	254.3	7.4
	K-1	586	232.1	210.0	250.6	7.7
	K-2	466	231.3	195.7	254.3	6.8
Температура зоны реакции (низ) колонны $T_{\text{рн}}$, °C	K-1+ K-2	1052	231.4	194.8	254.0	7.2
	K-1	586	232.8	210.8	250.4	6.5
	K-2	466	229.7	194.8	254.0	7.6
Температура низа колонны $T_{\text{н}}$, °C	K-1+ K-2	1052	232.3	195.9	254.1	6.7
	K-1	586	233.0	207.2	250.9	6.6
	K-2	466	231.3	195.9	254.1	6.7
Уровень от нижнего сварного шва цилиндрической части L , мм	K-1+ K-2	1052	12452	9957	14386	924
	K-1	586	13066	9957	14386	741
	K-2	466	11679	10192	12745	407
Температура воздуха $T_{\text{в}}$, °C	K-1+ K-2	1052	39.0	-2.8	78.8	18.7
	K-1	586	39.0	-2.7	78.8	19.2
	K-2	466	39.1	-2.8	75.4	18.0
Содержание кислорода в газах окисления CO_2 , %	K-1+ K-2	914	5.75	0.00	20.42	2.78
	K-1	550	5.98	0.75	20.42	2.59
	K-2	364	5.40	0.00	12.00	3.01
Время окисления $t_{\text{ок}}$, ч	K-1+ K-2	987	12.4	7.1	37.7	4.0
	K-1	521	10.0	7.1	19.6	2.6
	K-2	466	15.2	11.4	37.7	3.3
Температура размягчения окисленного битума по кольцу и шару $T_{\text{разб}}$, °C	K-1+ K-2	1089	56.1	37.4	68.5	3.6
	K-1	586	56.1	46.8	67.4	3.1
	K-2	503	56.1	37.4	68.5	4.2
Глубина проникания иглы окисленного битума при 25 °C P , 0.1 мм	K-1+ K-2	1088	51.8	32.0	205.0	11.8
	K-1	586	51.3	35.0	84.7	7.5
	K-2	502	52.3	32.0	205.0	15.3
Изменение температуры размягчения окисленного битума после старения DT , °C	K-1+ K-2	1087	7.3	4.5	23.7	0.9
	K-1	586	7.2	4.5	23.7	1.0
	K-2	501	7.4	4.5	12.0	0.8
Вязкость условная гудрона при 80 °C с диаметром отверстия 5 мм B , с	K-1+ K-2	1088	80.1	39.0	124.0	12.2
	K-1	540	80.2	39.0	124.0	12.2
	K-2	548	80.0	39.0	124.0	12.3
Температура вспышки гудрона в открытом тигле $T_{\text{вс}}$, °C	K-1+ K-2	1082	322.1	270.0	352.0	7.8
	K-1	537	322.1	270.0	352.0	7.8
	K-2	545	322.1	270.0	352.0	7.8
Температура размягчения гудрона по кольцу и шару $T_{\text{разб}}$, °C	K-1+ K-2	1082	28.0	25.0	33.0	1.3
	K-1	537	28.0	25.0	33.0	1.3
	K-2	545	28.0	25.0	33.0	1.3

да в уходящих газах окисления. Как видно, все рассчитанные значения критерия Стьюдента $t(10661)$ больше критического значения $t_{0.05}(10661) = 1.96$, следовательно, эти коэффициенты значимо отличаются от нуля.

Анализ табл. 2 показывает, что на концентрацию кислорода в газах окисления сильное влияние оказывают расходы сырья (гудрона) и воздуха, причем с ростом расхода сырья концентрация кислорода уменьшается, а с ростом расхода воздуха растет (β). Видно, что с ростом температуры в колонне окисления содержание кислорода в уходящих газах снижается.

Модель регрессии для прогнозирования глубины проникания иглы (Π) для битума имеет вид:

$$\Pi = 171.83 - 0.2772T_{pc} + 0.2466t_{ок} - 0.1259B - 1.7934T_{разг} \quad (3)$$

где B – вязкость условная полугудрона при 80 °С с диаметром отверстия 5 мм, с;

$T_{разг}$ – температура размягчения полугудрона по кольцу и шару, °С.

Коэффициент множественной корреляции равен $R^2 = 0.22$, а значение критерия Фишера по формуле (2) равен 64 при количестве наблюдений 906 и количестве факторов 4.

Установлено, что критическое значения критерия Фишера $F_{кр}(4.906)=2.38$, тогда $F > F_{кр}(4.906)$, следовательно, регрессионная модель адекватно описывает экспериментальные данные.

В табл. 3 представлены итоги регрессии для зависимой переменной – глубины проникания иглы для битума. Как видно, все рассчитанные значения критерия Стьюдента $t(906)$ больше кри-

тического значения $t_{0.05}(906)=1.96$, следовательно, эти коэффициенты значимо отличаются от нуля. Из таблицы видно, что наибольшее влияние на пенетрацию битума оказывает температура в колонне и температура размягчения гудрона – рост этих параметров приводит к снижению пенетрации. Для прогнозирования температуры размягчения окисленного битума использовали регрессионную зависимость между температурой размягчения битума $T_{разб}$ и пенетрацией Π (рис. 3).

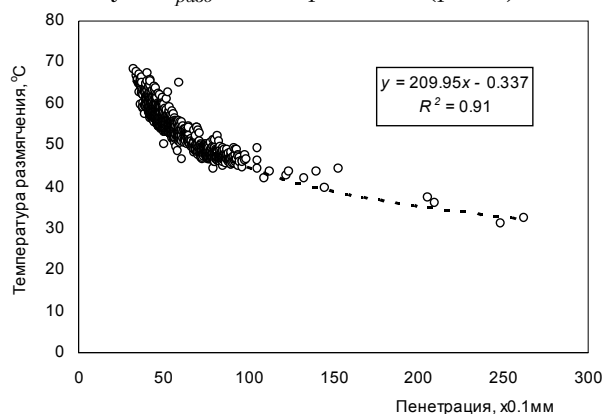


Рис. 3. График зависимости температуры размягчения окисленного битума от величины пенетрации

Показано, что зависимость хорошо описывается математической моделью

$$T_{разб} = 209.95\Pi^{0.337} \quad (4)$$

Теснота связи между этими величинами достаточно высокая и множественный коэффициент корреляции между ними составляет $R^2 = 0.91$, что гораздо выше полученного при линейной регрессии ($R^2 = 0.17$). Расчетное значение критерия Фишера равно 6653, а критическое значение

Таблица 2

Итоги регрессии для зависимой переменной CO_2

Члены ур-я	β	Стандартная ошибка β	b	Стандартная ошибка b	$t(10661)$	$t_{0.05}(10661)$
Свободный член	-	-	23.94	0.851302	28.13	1.96
F_c	-1.1649	0.044666	-0.5746	0.022033	-26.08	1.96
F_e	0.6003	0.039251	0.00178	0.000116	15.29	1.96
T_{pc}	-0.4498	0.008672	-0.161	0.003104	-51.87	1.96
L	0.6827	0.011488	0.00195	0.000033	59.43	1.96
T_e	0.1286	0.008197	0.0182	0.00116	15.69	1.96
$t_{ок}$	-0.2869	0.017495	-0.194	0.011816	-16.40	1.96

Таблица 3

Итоги регрессии для зависимой переменной Π

Члены ур-я	β	Стандартная ошибка β	b	Стандартная ошибка b	$t(906)$	$t_{0.05}(906)$
Свободный член	-	-	171.83	12.7001	13.53	1.96
T_{pc}	-0.2341	0.0328	-0.2772	0.0388	-7.14	1.96
$t_{ок}$	0.1199	0.0299	0.2466	0.0616	4.00	1.96
B	-0.1817	0.0383	-0.1259	0.0265	-4.74	1.96
$T_{разг}$	-0.2766	0.0397	-1.7934	0.2572	-6.97	1.96

Итоги регрессии для зависимой переменной П

Члены ур-я	β	Стандартная ошибка β	b	Стандартная ошибка b	$t(907)$	$t_{0.05}(907)$
Свободный член	-	-	-0.7766	0.87394	-0.89	1.96
T_{pc}	0.0976	0.0307	0.01056	0.00332	3.18	1.96
$t_{ок}$	0.1074	0.0306	0.0202	0.00576	3.51	1.96
$T_{разб}$	0.3916	0.0302	0.09544	0.00737	12.95	1.96

Таблица 5

Результаты подбора технологических параметров процесса окисления гудрона

Параметр	Расход сырья	Расход воздуха	Температура зоны реакции (середина) колонны	Уровень от нижнего сварного шва цилиндрической части (на период пуска)	Температура воздуха	Время окисления	Содержание кислорода в газах окисления
К-1							
14.02.2025	18.04	2799.06	233.38	14124.38	44.68	8.89	7.16
Вариант 1	18.00	2376.78	230.2	13403.44	47.13	8.45	6.12
Вариант 2	18.01	2562.12	234.06	14013.97	37.04	8.83	6.76
К-2							
14.02.2025	6.90	532.34	219.27	12164.64	40.85	12.47	7.67
Вариант 1	6.04	716.28	232.25	12127.49	44.19	14.21	6.05
Вариант 2	5.98	962.53	234.92	12068.90	31.92	14.28	5.74

$F_{0.05}(2.6653) = 3$. Таким образом, $F_{0.05}(2.6653) < 6653$, следовательно модель адекватно описывает экспериментальные данные.

Модель регрессии для прогнозирования изменения температуры размягчения после старения (DT) имеет вид:

$$DT = -0.7766 + 0.01056T_{pc} + 0.09544T_{разб} + 0.0202t_{ок}, \quad (5)$$

Коэффициент множественной корреляции равен $R^2 = 0.17$, а значение критерия Фишера 62 при количестве наблюдений 907 и количестве факторов 3. Критическое значение критерия Фишера $F_{кр}(3.907) = 2.61$, тогда $F > F_{кр}(3.907)$, следовательно, регрессионная модель адекватно описывает экспериментальные данные.

В табл. 4 представлены итоги регрессии для зависимой переменной – изменения температуры размягчения после старения. Как видно, все рас-

считанные значения критерия Стьюдента $t(907)$ больше критического значения $t_{0.05}(907) = 1.96$, следовательно, эти коэффициенты значимо отличаются от нуля. Однако для свободного члена $t(907) < t_{0.05}(907)$.

При работе установки 14.02.2025 на сырье с условной вязкостью при 80 °С 70 с и температурой размягчения 27 °С содержание кислорода в газах окисления превышали нормы технологического регламента (не более 7,0 % об.). Используя математическую модель (1) были подобраны параметры технологического режима, которые позволили обеспечить регламентное содержание кислорода в газах окисления (табл. 5).

Таким образом, полученные математические модели позволяют управлять процессом промышленного производства окисленных битумов и прогнозировать физико-химические свойства готовой продукции в зависимости от исходного состава сырья и параметров ведения процесса.

Литература

1. Об утверждении перечней мероприятий по осуществлению дорожной деятельности в 2023–2027 годах в отношении автомобильных дорог общего пользования федерального, регионального, межмуниципального и местного значения: распоряжение Правительства РФ от 20.06.2022 №1601-р // Собрание законодательства РФ. – 2022. – Ст.4530.
2. Гун Р.Б. Нефтяные битумы. – М.: Химия, 1973. – 432 с.
3. Пряхин В.Н., Карапетян М.А., Андреев В.Д. Методы, модели и средства математического моделирования технологических процессов // Международный технический журнал. – 2023. – №1(87). – С.36-45.

References

1. *Ob utverzhdenii perechny meropriyatiy po osushhestvleniyu dorozhnoy deyatel'nosti v 2023–2027 godakh v otnoshenii avtomobil'nykh dorog obshhego pol'zovaniya federal'nogo, regional'nogo, mezhmunicipal'nogo i mestnogo znacheniya: rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 20.06.2022 №1601-r* [On approval of the lists of measures for the implementation of road activities in 2023–2027 in relation to public roads of federal, regional, inter-municipal and local significance: Order of the Government of the RF of June 20, 2022 no.1601-r]. *Sobranie zakonodatel'stva RF* [Collection of Legislation of the Russian Federation], 2022, Art. 4530.
2. Gun R.B. *Neftjanye bitумы* [Petroleum bitumen]. Moscow, Khimiya Publ., 1973, 432 p.

4. Звонарев С.В. Основы математического моделирования. – Екатеринбург: Изд-во УрГУ, 2019. – 112 с.
5. Караулова А.В., Базилевский М.П. Применение регрессионного анализа при решении реальных задач технического характера // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2020. – №3(9). – С.229-236.
6. Evdokimova N.G., Murtazin F.R., Tselishchev I.V. Regression analysis of operation at modified road bitumen unit // Химия и технология топлив и масел. – 2001. – №3. – С.18-19.
7. Евдокимова Н.Г., Шишкина О.Ю., Муртазин Ф.Р., Левина Т.М., Муталлапов Р.Н., Старцева Е.В. О Совершенствование процесса производства нефтяных битумов методами математического моделирования // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2024. – №4. – С.194-217.
8. Evdokimova N.G., Murtazin F.R., Makhmutova A.R. Identification of technological parameters process of petroleum road bitumen by mathematical modeling // Processes of Petrochemistry and oil Refining. – 2024. – №2. – Pp.498-506.
3. Pryakhin V.N., Karapetyan M.A., Andreev V.D. *Metody, modeli i sredstva matematicheskogo modelirovaniya tekhnologicheskikh protsessov* [Methods, models and tools of mathematical modeling of technological processes]. *Mezhdunarodnyi tekhnicheskii zhurnal* [International technical journal], 2023, no.1(87), pp.36-45.
4. Zvonarev S.V. *Osnovy matematicheskogo modelirovaniya* [Fundamentals of Mathematical Modeling]. Ekaterinburg, Ural State University Publishing House, 2019, 112 p.
5. Karaulova A.V., Bazilevskiy M.P. *Primenenie regressiionnogo analiza pri reshenii real'nykh zadach tekhnicheskogo kharaktera* [The use of regression analysis in solving real-world technical problems]. *Molodaya nauka Sibiri: elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Young Science of Siberia: an electronic scientific journal], 2020, no.3(9), pp.229-236.
6. Evdokimova N.G., Murtazin F.R., Tselishchev I.V. [Regression analysis of operation of a modified paving asphalt production plant]. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2001, vol.37, no.3, pp.163-166.
7. Evdokimova N.G., Shishkina O.Ju., Murtazin F.R., Levina T.M., Mutallapov R.N., Startseva E.V. *O Sovershenstvovanie protsessa proizvodstva neftyanykh bitumov metodami matematicheskogo modelirovaniya* [On the improvement of the production process of petroleum bitumen by mathematical modeling methods]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal Neftegazovoye delo* [Electronic scientific journal Oil and Gas Business], 2024, no.4, pp.194-217.
9. Evdokimova N.G., Murtazin F.R., Makhmutova A.R. [Identification of technological parameters process of petroleum road bitumen by mathematical modeling]. *Processes of Petrochemistry and oil Refining*, 2024, no.2, pp.498-506.