

*морфологические основы адаптации растительных объектов в условиях изменяющегося климата высоких широт» (№ АААА-А18-118012390231-9) с использованием оборудования ЦКП НО "Арктика" САФУ и ЦКП КТ РФ-Арктика (ФИЦКИА РАН).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кения М.В., Лукаш А.И., Гуськов Е.П. Роль низкомолекулярных антиоксидантов при окислительном стрессе // Успехи современной биологии, 1993. Т. 113. № 4. С. 456–470.
2. Заварзин, Г.А. Эволюция прокариотной биосферы: “Микробы в круговороте жизни”. 120 лет спустя: Чтение им. С.Н. Виноградского / Под ред. Н.Н. Колотилова. М.: Макс Пресс, 2011. 144 с.
3. Скрыбина К.Г., Вихоревой Г.А., Варламова В.П. Хитин и хитозан. Получение, свойства и применение. М.: Наука, 2002. 359 с.
4. Бровко О.С., Ивахнов А.Д., Паламарчук И.А., Бойцова Т.А. Сверхкритическая флюидная экстракция усниновой кислоты из лишайника рода *Cladonia* // Сверхкритические флюиды: Теория и практика. 2017. Т. 12. № 1. С. 41-49
5. Феофилова Е.П., Терешина В.М., Меморская А.С. Хитин мицелиарных грибов: Методы выделения, идентификации и физико-химические свойства // Микробиология, 1995. Т. 64. № 1. С. 27-31.

УДК 665.948

А.А. Сосновская, аспирант, Я.В. Боркина, магистрант  
В.Л. Флейшер, доц., канд. техн. наук  
[8shurka8@mail.ru](mailto:8shurka8@mail.ru) (БГТУ, г. Минск)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЖИДКОФАЗНОГО ОКИСЛЕНИЯ АЛЬФА-ПИНЕНА

Процесс окисления  $\alpha$ -пинена является хорошо изученным в настоящее время. Окисление может происходить как с сохранением углеродного скелета, так и с разрушением бициклической системы. В зависимости от условий проведения реакции, а также от используемых каталитических систем молекула  $\alpha$ -пинена, содержащая в своей структуре несколько реакционноспособных групп, может окисляться в различных направлениях. Продукты окисления  $\alpha$ -пинена находят разнообразное применение в различных отраслях промышленности, а его индивидуальные кислородсодержащие производные используются для тонкого органического синтеза [1].

Жидкофазное окисление терпеновых углеводородов кислородом воздуха происходит согласно свободно-радикальному механизму. Как известно [2], на поверхности солей металлов переменной валентности

(кобальта, никеля, железа, меди и др.), обладающих хорошей каталитической активностью происходит генерирование свободных радикалов, участвующих в образовании терпеновых кислородсодержащих соединений (далее ТКС), таких как вербенон, вербенол, окись  $\alpha$ -пинена. При исследовании процесса жидкофазного окисления  $\alpha$ -пинена был выбран катализатор стеарат кобальта (II) который, как известно, является более активным и легко синтезируемым в сравнении с солями никеля, меди, железа и другими металлами переменной валентности. На количественное содержание радикалов и образующихся благодаря им гидроперекисям существенное влияние оказывают условия проведения процесса окисления. Поэтому целью настоящих исследований являлось оптимизировать процесс жидкофазного окисления  $\alpha$ -пинена кислородом воздуха в присутствии катализатора стеарата кобальта (II).

Оптимизацию процесса получения ТКС проводили с использованием плана второго порядка (плана Бокса). Как известно [3], в наибольшей степени на выход ТКС влияют температура процесса, продолжительность окисления и расход кислорода воздуха. Исходя из этого в качестве независимых переменных были выбраны следующие факторы:  $X_1$  – температура окисления,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $X_2$  – расход воздуха, мл/мин;  $X_3$  – продолжительность окисления, ч. Выходными параметрами являлись:  $Y_1$  – содержание полимеров в смеси, %;  $Y_2$  – содержание окисленных веществ в оксидате, %;  $Y_3$  – содержание мономеров, %. Жидкофазное окисление проводили при постоянной массе катализатора 0,4 мас. %. Основные факторы, уровни их варьирования и результаты оптимизации представлены в табл. 1.

**Таблица 1 – Основные факторы, уровни их варьирования и результаты оптимизации**

Уровни варьирования	Факторы			Результаты оптимизации		
	Температура $X_1$ , $^{\circ}\text{C}$	Расход воздуха $X_2$ , мл/мин	Продолжительность процесса $X_3$ , ч	$Y_1$ , %	$Y_2$ , %	$Y_3$ , %
Шаг варьирования, $\lambda$	15	200	5	30,30	27,04	69,70
Нижний уровень, (-1)	55	600	5			
Основной уровень, (0)	70	800	10			
Верхний уровень, (+1)	85	1000	15			

Снижение количества полимеров ( $Y_1$ ) и компонентов, не вступивших в реакцию ( $Y_3$ ), а также максимизирование выхода вербоксии

да ( $Y_2$ ) являлось основной задачей оптимизации, решение которой основывалось на нахождении оптимальных режимов проведения процесса.

Для реализации плана Бокса составлена матрица планирования эксперимента, получены уравнения регрессии для трех критериев оптимизации, построены графики одномерных сечений, которые отражают зависимости содержания ТКС, полимеров и мономеров в оксидате от температуры, расхода воздуха и продолжительности процесса.

Решением задачи оптимизации являлся поиск таких значений факторов, которым соответствует оптимальное сочетание значений выходных параметров. Поиск осуществляли с использованием глобального критерия оптимизации  $W_i$  с последующим определением сочетаний факторов, обеспечивающих его максимум. Нахождение глобального критерия оптимизации  $W_i$  сводили к нахождению частных функций полезности  $d_j$  и коэффициентов уравнения регрессии. Полученные значения частных функций полезности  $d_j$  и глобального критерия оптимизации  $W_i$  представлены в табл. 2.

В результате оптимизации были получены математические модели, которые описывают влияние температуры, расхода воздуха, продолжительности процесса окисления на содержания ТКС, мономеров и полимеров в реакционной смеси.

**Таблица 2 – Значения частных функций полезности и глобального критерия оптимизации**

№ опыта	Выходные параметры			Частные функции полезности			Глобальный критерий оптимизации
	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$d_{1j}$	$d_{2i}$	$d_{3i}$	
1	30,46	20,33	69,36	0,87	0,23	0,87	0,56
2	18,33	13,65	81,67	0,95	0,05	0,95	0,36
3	42,19	37,86	57,81	0,69	0,79	0,69	0,73
4	39,82	52,39	60,18	0,74	0,95	0,74	0,80
5	30,15	31,62	69,85	0,87	0,64	0,87	0,79
6	28,84	23,97	71,16	0,89	0,36	0,89	0,66
7	54,41	40,01	45,59	0,37	0,83	0,37	0,48
8	67,84	27,41	32,16	0,05	0,49	0,05	0,11
9	37,59	20,92	62,41	0,78	0,25	0,78	0,53
10	31,60	29,12	68,40	0,86	0,55	0,86	0,74
11	45,99	39,13	54,01	0,61	0,81	0,61	0,67
12	40,67	35,33	59,33	0,73	0,74	0,73	0,73
13	49,71	30,52	50,29	0,51	0,60	0,51	0,54
14	49,76	25,10	50,24	0,51	0,41	0,51	0,47

Таким образом, для достижения одновременно максимального выхода ТКС при минимальном содержании полимеров и мономеров процесс окисления следует проводить при следующих параметрах: температура окисления – 70–73°C, расход воздуха – 1000–1100 мл/мин, продолжительность процесса – 5–7 ч. При этом содержание основных продуктов в оксидате составляет: ТКС – 27,04%, мономеров – 69,70%, полимеров – 30,30%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Меньшиков, С.Ю. Сравнительное изучение аэробного окисления скипидара / С.Ю. Меньшиков, [и др.] // Журнал прикладной химии. – 2008. – Т. 81. – №1. – С. 56–58.
2. Кислицин, А.Н. О химизме жидкофазного окисления  $\alpha$ -пинена кислородом воздуха / А.Н. Кислицин, А.Н. Клабукова, А.Н. Трофимов // Химия растительного сырья. – 2004. – №3. – С. 109–116.
3. Кислицин, А.Н. Исследование процесса жидкофазного инициированного окисления сульфатного  $\alpha$ -пинена кислородом воздуха. Сообщение 2 / А.Н. Кислицин, А.Н. Клабукова, А.Н. Трофимов // Химия растительного сырья. – 2003. – №4. – С. 31–36.

УДК 543.421/424

К.Г. Боголицын<sup>1,2</sup>, проф., д-р хим. наук  
М.А. Гусакова<sup>1</sup>, канд. техн. наук, С.С. Хвиюзов<sup>1</sup>, канд. хим. наук  
[khviyuzov.s@yandex.ru](mailto:khviyuzov.s@yandex.ru)  
(<sup>1</sup>ФГБУН ФИЦКИА РАН, <sup>2</sup>САФУ имени М.В. Ломоносова  
г. Архангельск, Россия)

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ПРИРОДЫ ЛИГНИНОВ МЕТОДОМ ИК-ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ

В настоящее время особую актуальность приобретают исследования, направленные на изучение колоссальных ресурсов биомассы растений. С современных позиций древесное вещество рассматривается как бионанокompозит, основу которого составляют полисахаридные компоненты (целлюлоза и гемицеллюлозы) и лигнин. При этом все большее внимание исследователей привлекает лигнин – ароматический полифункциональный полимер нерегулярного строения, занимающий по распространенности в природе второе место среди растительных полимеров. Лигнин является одним из основных компонентов клеточной стенки растений, его содержание в лиственной древесине составляет 18-24%, а в хвойной – 27-32%. Функциональная природа и строение лигнина определяют реакционная способность и по-