

## КАТАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ФОСФОРСОДЕРЖАЩЕГО ЭКСТРАГЕНТА — ТРИБУТИЛФОСФАТА

© Г. К. Бишимбаева, А. М. Налибаева, Г. С. Полимбетова,  
А. К. Борангазиева, Ж. У. Ибраимова, А. К. Жанабаева

Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д. В. Сокольского, Алматы,  
Республика Казахстан  
E-mail: ak-bor@inbox.ru

Поступила в Редакцию 18 сентября 2018 г.

После доработки 24 января 2019 г.

Принята к публикации 28 января 2019 г.

*Методами кинетики, волюмометрии, газовой хроматографии, элементного анализа, ИК-, ЯМР-спектроскопии исследована реакция окислительного алкоксилирования желтого фосфора до эфиров кислот фосфора в спиртовых растворах солей меди и железа с использованием в качестве окислителя кислорода. Изучено влияние температуры, парциального давления кислорода, природы и концентрации реагентов на конверсию фосфора. Новизна и актуальность исследований связана с разработкой «бесхлорных» прямых синтезов эфиров кислот фосфора из фосфора и спиртов. Установлено, что наибольшей каталитической активностью характеризуются галогениды меди при оптимальном отношении  $\text{CuX}_2/\text{P}_4$  5–10 и температуре 60°C. Парциальное давление кислорода существенно не влияет на выход эфиров кислот фосфора. В оптимальных условиях проведены укрупненные лабораторные испытания каталитического синтеза трибутилфосфата из желтого фосфора и бутанола, в которых количество введенного в реакцию фосфора увеличено в 20–40 раз по сравнению с опытными исследованиями.*

Ключевые слова: окислительное алкоксилирование; желтый фосфор; спирты; соли меди и железа; кислород; триалкилфосфаты; диалкилфосфиты

DOI: 10.1134/S0044461819040108

Для регенерации отработавшего топлива на атомных электростанциях широко применяется экстракционный метод. Революционным переворотом в экстракционной технологии ядерного горючего стало применение фосфорорганических экстрагентов, в частности эфира фосфорной кислоты — трибутилфосфата (ТБФ)  $[\text{P}(\text{O})(\text{O}^i\text{Bu})_3]$ , который отличается высокой избирательностью, стойкостью к агрессивным средам и удобством реэкстракции — обратного получения соли металла из раствора комплекса в органическом растворителе. Обычно ТБФ используют для экстракции урана, тория, плутония и редкоземельных элементов из азотнокислых растворов [1–4]. Благодаря более высокой экстракционной

способности константа экстракции уранилнитрата по сравнению с известным метилизобутилкетонем возрастает на шесть порядков. Трибутилфосфат образует с солью уранила комплекс, который легко переходит в органическую фазу. Для протекания процесса в экстракторах применяют раствор ТБФ в предельных углеводородах, доля разбавителя составляет 60–98%. Помимо изменения прочности химической связи между ТБФ и нитратами разбавление понижает плотность экстрагента, что облегчает аппаратное оформление экстракционного процесса.

Фосфорилирование элементарным фосфором органических соединений является одним из наиболее удобных и перспективных путей формирования

связей Р–С и Р–О–С, синтеза фосфинов, фосфиноксидов, эфиров кислот фосфора — ключевых объектов в химии фосфорорганических соединений [5, 6]. Технология получения эфиров фосфорсодержащих кислот основана на окислении Р<sub>4</sub> хлором с последующим фосфорилированием спиртов хлоридами и оксихлоридами фосфора и связана с образованием значительного количества токсичных, трудноутилизуемых хлорсодержащих отходов. Возрастающий спрос на ценные фосфорорганические продукты и повышенные экологические требования стимулируют поиски альтернативных способов конверсии желтого фосфора без участия хлора. В качестве экологически безопасного процесса нами разработан прямой каталитический синтез эфиров фосфорсодержащих кислот из элементного фосфора и алифатических спиртов с использованием в качестве окислителя кислорода.

Целью настоящего исследования являлась разработка каталитического синтеза фосфорсодержащего экстрагента — трибутилфосфата из желтого фосфора и бутилового спирта.

### Экспериментальная часть

Желтый фосфор является высокотоксичным, летучим, пожаро- и взрывоопасным веществом. В большинстве случаев в экспериментах использовали не твердый Р<sub>4</sub>, а его растворы в бензоле или толуоле. Навеску фосфора предварительно очищали от окисной пленки, отрезали и взвешивали под водой, промывали от остатков воды в двух склянках с этанолом и толуолом при комнатной температуре, а затем растворяли в безводном бензоле или толуоле при температуре плавления белого фосфора. Концентрацию растворенного Р<sub>4</sub> (моль · л<sup>-1</sup>) определяли методом иодометрического титрования. В процессах окислительной функционализации желтого фосфора использовали тщательно осушенные реагенты марки х.ч., поскольку примеси воды снижали выход эфиров кислот фосфора из-за конкурирующей побочной реакции окислительного гидроксирования фосфора. Спирты осушали кипячением над СаО, арены — путем перемешивания с концентрированной серной кислотой с последующей декантацией и перегонкой. Галогениды меди обезвоживали при 100–120°C до постоянной массы. Хлорид железа (97%, производства Германии) использовали без предварительной осушки. Газы (О<sub>2</sub>, воздух, Ar) осушали, пропуская через хлористый кальций.

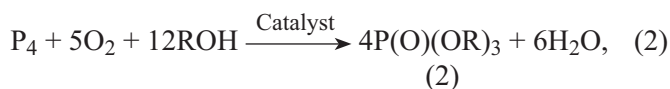
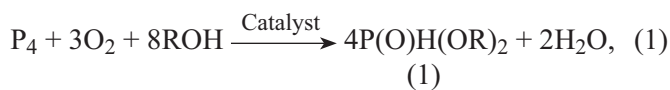
Кинетику каталитических процессов окисления Р<sub>4</sub> кислородом в спиртах изучали волюмометрическим методом в замкнутой изотермической установке, которая состояла из интенсивно встряхиваемого

стеклянного реактора объемом 150 см<sup>3</sup> с водяной «рубашкой», снабженного капельной воронкой, потенциометрическим устройством, соединенного с газометрическими бюретками, содержащими кислород. Общий объем жидкой фазы в реакторе составлял 10–20 мл. В качестве запорной жидкости в бюретках использовали высококипящий спирт. Потенциометрическое устройство состояло из платинового и каломельного электродов со шлифом в качестве электролитического ключа. Парциальное давление кислорода р<sub>О<sub>2</sub></sub> в реакторе поддерживали равным 0.2–1.0 атм.

Синтез и накопление целевых продуктов осуществляли в круглодонной трехгорлой колбе емкостью 300 мл, снабженной мешалкой, путем порционного введения аренового раствора фосфора в реактор, содержащий спирт и катализатор. После завершения синтеза соли меди осаждали бикарбонатом натрия для удаления парамагнитных частиц, из оставшегося раствора удаляли избыток спирта, арена на ротационном испарителе ER-1M2 при 200 мм рт. ст. Темный маслянистый остаток подвергали вакуумной разгонке на лабораторной установке при 5–10 мм рт. ст. или стеклянном приборе BUCHI GKR-51 при 2–5 мм рт. ст. Эфиры фосфорной и фосфористой кислот идентифицировали по температурам кипения, показателям преломления, методами хроматографии, элементного анализа и ИК-, ЯМР-спектроскопии. Спектры <sup>31</sup>P ЯМР регистрировали на приборе Bruker WP-80 и WM-250, ИК-спектры — на спектрометре Specord IR-75, анализы ГЖХ проводили на приборе Shimadzu QP 5000, снабженном капиллярной колонкой (Supelco SPB-1, 30 м, D 0.25 мм, 0.25 мкм).

### Обсуждение результатов

Для получения диалкилфосфитов Р(О)Н(ОР)<sub>2</sub> (1) и триалкилфосфатов Р(О)(ОР)<sub>3</sub> (2) из элементного фосфора и алифатических спиртов использовали металлокомплексный катализ, позволяющий осуществить реакции окислительного алкоксилирования фосфора с участием кислорода при 40–80°C [7–9]:



где R — Me, Et, Pr, Bu, *i*-Am; catalyst — CuX<sub>2</sub> (X = Cl, Br, acac, CH<sub>3</sub>CO<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>CO<sub>2</sub>, C<sub>17</sub>H<sub>35</sub>CO<sub>2</sub>), FeCl<sub>3</sub>, CuCl<sub>2</sub>/FeCl<sub>3</sub>, I<sub>2</sub>/FeCl<sub>3</sub>.

В табл. 1 приведены результаты опытов по окислению  $P_4$  в бутанольных растворах солей меди и железа. В присутствии галогенидов меди при  $60^\circ\text{C}$  и отношении  $\text{Cu}/P_4$  5–10 формируется преимущественно ТБФ с выходом 84–100% (опыты № 1–4), карбоксилаты меди способствуют образованию дибутилфосфита до 70% (опыты № 5, 6).

В аналогичных условиях в системах с использованием хлорида железа выход ТБФ составил 24–44% (опыты № 7–9). Повышение температуры до  $90^\circ\text{C}$  способствует формированию эфира фосфорной кислоты с выходом 91% (опыты № 10–12). В смешанной системе  $\text{I}_2/\text{FeCl}_3$  формируется преимущественно ТБФ с выходом 88%, однако присутствие иода осложняет отгонку целевого продукта (опыт № 13). В табл. 1 также приведено отношение содержания катализатора к фосфору.

В табл. 2 приведены результаты опытов по окислению  $P_4$  в спиртовых растворах солей меди. В метанольном растворе галогенидов меди при  $40^\circ\text{C}$  с

увеличением отношения  $\text{Cu}/P_4$  2.5–10 выход триметилфосфата возрастает до 78% (опыты № 1–4).

При использовании кислородсодержащих соединений меди конверсия  $P_4$  снижается до 48% (опыты № 5–7). В этанольном растворе хлоридов меди выход триэтилфосфата составляет 92–100% (опыты № 8, 9), в присутствии стеарата меди при  $50^\circ\text{C}$  конверсия  $P_4$  составляет 50%, выход фосфата — 15% (опыт № 10). В пропанольном растворе хлорида меди выход трипропилфосфата — 66%, кислородсодержащие соли меди при  $50$ – $60^\circ\text{C}$  формируют диалкилфосфит 53–87% (опыты № 12, 13). В среде изоамилового спирта при  $80^\circ\text{C}$  выход фосфата возрастает до 83% (опыты № 14, 15), в атмосфере аргона конверсия  $P_4$  составляет 98% с преимущественным образованием диалкилфосфита (опыт № 16). В табл. 2 также приведено отношение содержания соли меди к фосфору.

Экспериментальные данные (табл. 1, 2) позволяют заключить, что наибольшей каталитической активностью в реакции окислительного алкоксилирования  $P_4$

Таблица 1

Каталитическое окисление желтого фосфора кислородом в бутанольных растворах солей меди и железа ( $p_{\text{O}_2} = 1$  атм)

№ опыта	Содержание, мас%				$T, ^\circ\text{C}$	Катализатор $P_4$	Дибутил- фосфит $\text{P}(\text{O})\text{H}(\text{O}Bu)_2$ (1)	Трибутил- фосфат $\text{P}(\text{O})(\text{O}Bu)_3$ (2)
	катализатор	$P_4$	BuOH	толуол			%	
1	$\text{CuCl}_2$ (4.58)	0.9	36.1	58.32	60	5.1	—	92
2	$\text{CuCl}_2$ (4.6)	0.45	36.4	58.59	60	10.2	—	100
3*	$\text{CuBr}_2$ (2.35)	0.23	66.7	30.71	60	10.2	3	97
4	$\text{CuBr}_2$ (4.7)	0.45	72.6	19.51	60	10.4	—	84
5	$\text{Cu}(\text{acac})_2$ (4.07)	0.35	75.35	20.23	60	11.6	78	22
6	$\text{Cu}(\text{C}_3\text{H}_7\text{CO}_2)_2$ (3.71)	0.35	65.78	30.28	60	10.6	70	30
7	$\text{FeCl}_3$ (2.14)	0.24	77.0	20.66	60	9.0	11	25
8 *	$\text{FeCl}_3$ (1.2)/ $\text{CuCl}_2$ (0.24)	0.24	87.83	10.48	60	6.0	23	44
9 *	$\text{FeCl}_3$ (0.36)/ $\text{CuCl}_2$ (1.0)	0.24	87.93	10.49	60	5.5	9	29
10	$\text{FeCl}_3$ (3.1)	0.92	55.93	40.05	70	3.4	29	57
11 *	$\text{FeCl}_3$ (1.43)	0.36	77.42	20.79	80	4.0	6	81
12 *	$\text{FeCl}_3$ (1.43)	0.6	77.23	20.74	90	2.4	7	91
13**	$\text{FeCl}_3$ (1.19)/ $\text{I}_2$ (0.6)	0.18	77.23	20.74	60	9.9	—	88

\*  $p_{\text{O}_2} = 0.6$  атм.

\*\*  $p_{\text{O}_2} = 0.2$  атм.

**Таблица 2**  
Окисление желтого фосфора кислородом в спиртовых растворах  $\text{CuX}_2$  ( $p_{\text{O}_2} = 1$  атм)

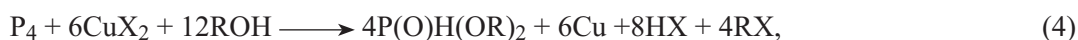
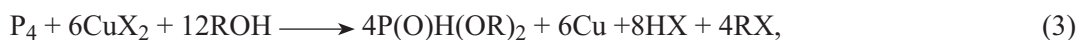
№ опыта	Содержание, мас%				$T, ^\circ\text{C}$	$\frac{\text{CuX}_2}{\text{P}_4}$	Диалкил-фосфит	Триалкил-фосфат
	$\text{CuX}_2$	$\text{P}_4$	ROH	толуол			$\text{P}(\text{O})\text{H}(\text{OR})_2$ (1)	$\text{P}(\text{O})(\text{OR})_3$ (2)
							%	
MeOH								
1	$\text{CuCl}_2$ (1.08)	0.42	56.87	41.58	40	2.6	—	48
2	$\text{CuCl}_2$ (2.24)	0.41	56.2	41.1	40	5.4	—	67
3	$\text{CuCl}_2$ (4.28)	0.4	55.03	40.23	40	10.6	—	78
4	$\text{CuBr}_2$ (2.87)	0.36	75.93	20.83	50	8.0	—	69
5	$\text{CuSO}_4$ (1.96)	0.24	87.29	10.64	40	8.2	—	48
6	$\text{Cu}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2$ (2.41)	0.36	76.3	20.94	50	6.6	—	53
7	$\text{Cu}(\text{C}_3\text{H}_7\text{CO}_2)_2$ (2.74)	0.35	73.89	20.28	50	7.8	—	51
EtOH								
8	$\text{CuCl}_2$ (3.73)	0.47	55.24	40.56	40	8.0	—	92
9	$\text{CuCl}_2$ (3.9)	0.45	53.26	39.1	40	8.6	—	100
10	$\text{Cu}(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{CO}_2)_2$ (3.5)	0.45	62.77	29.63	50	7.8	35	15
PrOH								
11	$\text{CuCl}_2$ (2.49)	0.36	76.31	20.85	50	7.0	—	66
12	$\text{Cu}(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{CO}_2)_2$ (2.46)	0.24	26.72	67.52	60	10.25	74	26
13	$\text{Cu}(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{CO}_2)_2$ (4.04)	0.36	25.97	65.63	60	11.2	87	13
<i>i</i> -AmOH								
14	$\text{Cu}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2$ (2.12)	0.36	67.02	29.73	50	5.9	24	59
15	$\text{Cu}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2$ (2.12)	0.36	67.02	30.74	80	5.9	4	83
16*	$\text{Cu}(\text{C}_3\text{H}_7\text{CO}_2)_2$ (3.18)	0.36	64.81	19.82	70	8.8	68	30

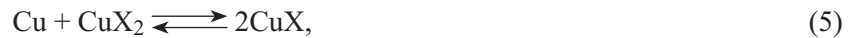
\* Атмосфера аргона.

до эфиров фосфорной кислоты характеризуются галогениды меди при оптимальном отношении  $\text{CuX}_2/\text{P}_4$  5–10 и температуре  $60^\circ\text{C}$ . Соли железа проявляют высокую активность при температуре  $80\text{--}90^\circ\text{C}$ , повышение парциального давления кислорода от 0.2 до 1.0 атм существенно не влияет на выход эфиров фосфорной кислоты. Несмотря на высокие выходы триалкилфосфатов в растворах низкомолекулярных спиртов, в литературе не приводятся данные по использованию

их в качестве экстрагентов радиоактивных элементов и тяжелых металлов. С повышением молекулярной массы спиртов скорость реакции окислительного алкоксилирования фосфора снижается [7–10].

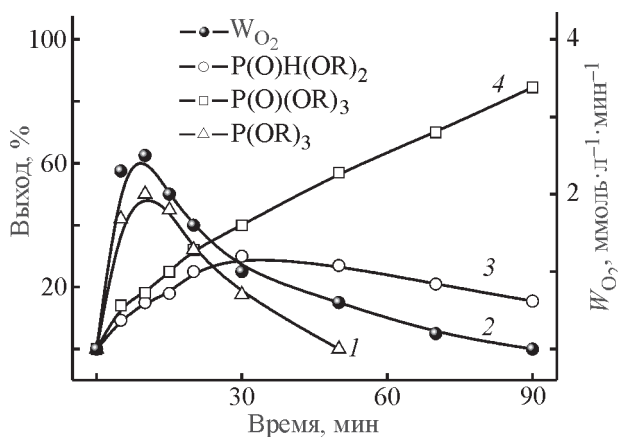
Опыты, проведенные в инертной атмосфере, свидетельствуют о том, что в присутствии  $\text{CuX}_2$  фосфор с кислородом непосредственно не взаимодействует, роль переносчика электронов с молекулы  $\text{P}_4$  на  $\text{O}_2$  выполняют соединения меди:





Каталитический цикл замыкается в результате окисления Cu до CuX [реакция (5)], который под действием кислорода переходит в CuX<sub>2</sub> [реакция (6)]. В отсутствие катализатора фосфорорганические производные не формируются, наблюдается густой белый дым оксидов фосфора, образующихся в результате радикально-цепного окисления P<sub>4</sub> кислородом.

Оптимальные условия проведения каталитического синтеза трибутилфосфата из желтого фосфора и бутанола определены на основе экспериментальных данных. На рисунке представлена зависимость скорости поглощения кислорода и выхода основных и промежуточных продуктов реакции окисления P<sub>4</sub> кислородом в бутанольном растворе CuCl<sub>2</sub> от времени. Хроматографический мониторинг показал, что в этих условиях достигается полная конверсия P<sub>4</sub> в фосфорорганические соединения. Кроме основных продуктов реакции в каталитическом растворе обнаружен трибутилфосфит P(OC<sub>4</sub>H<sub>9</sub>)<sub>3</sub>, выход которого достигает 50% на 10-й минуте, но затем снижается до нуля (кривая 1). Скорость поглощения кислорода W<sub>O<sub>2</sub></sub> достигает максимума 2.5 ммоль·л<sup>-1</sup>·мин<sup>-1</sup> на 10-й минуте реакции, а к концу опыта падает (кривая 2). Представленные зависимости свидетельствуют о том, что промежуточный P(OC<sub>4</sub>H<sub>9</sub>)<sub>3</sub> постепенно превращается в основные продукты — дибутылфосфит



Зависимость выхода продуктов и скорости поглощения O<sub>2</sub> от времени реакции окисления P<sub>4</sub> кислородом в спиртовом растворе CuCl<sub>2</sub> при 60°C.

$$p_{\text{O}_2} = 0.6 \text{ атм}; [\text{CuCl}_2] = 4.8, [\text{P}_4] = 0.89, [\text{BuOH}] = 74, [\text{C}_7\text{H}_8] = 20.2 \text{ мас\%}.$$

1 — трибутилфосфит P(OC<sub>4</sub>H<sub>9</sub>)<sub>3</sub>, 2 — скорость поглощения кислорода W<sub>O<sub>2</sub></sub>, 3 — дибутылфосфит P(O)H(OC<sub>4</sub>H<sub>9</sub>)<sub>2</sub>, 4 — трибутилфосфат P(O)(OC<sub>4</sub>H<sub>9</sub>)<sub>3</sub>.

P(O)H(OC<sub>4</sub>H<sub>9</sub>)<sub>2</sub> и трибутилфосфат P(O)(OC<sub>4</sub>H<sub>9</sub>)<sub>3</sub>, выход которых в конце реакции достигает 16 и 84% (кривые 3, 4). Полученные данные соответствуют кинетическим закономерностям реакции окислительного алкоксилирования фосфора в спиртовых растворах меди кислородом и основным стадиям координационного механизма реакции, представленным в работах [7–10].

На основании результатов эксперимента в оптимальных условиях были проведены укрупненные лабораторные испытания каталитического способа получения трибутилфосфата из фосфора и бутанола с использованием в качестве окислителя кислорода, в которых количество введенного в реакцию P<sub>4</sub> было увеличено в 20–40 раз по сравнению с опытными исследованиями.

*Система CuCl<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/n-BuOH.* Раствор фосфора (1.8 г P<sub>4</sub>) в бензоле (94 мл) порционно по 2–3 мл добавляли в раствор CuCl<sub>2</sub> (3.5 г) в бутаноле (140 мл) при 60°C и постоянном барботаже воздуха через каталитический раствор. Исходный светло-зеленый прозрачный раствор после введения P<sub>4</sub> становился мутно-коричневым, затем выпадал белый осадок CuCl. В ходе барботажа воздуха CuCl постепенно окислялся и растворялся, цвет раствора опять становится зеленым. Общее количество каталитических циклов равнялось 36, время синтеза — 33 ч. При вакуумной перегонке селективно выделен трибутилфосфат (13.5 г; 87%). Белый дым оксидов фосфора над растворами отсутствовал. Синтез замедлялся по мере разбавления спирта бензолом.

*Система Cu(C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>CO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/n-BuOH.* Раствор фосфора (1.4 г) в толуоле (100 мл) порционно по 2–3 мл добавляли в раствор бутирата Cu(C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>CO<sub>2</sub>)<sub>2</sub> (5 г) в бутаноле (150 мл) при 65°C и постоянном барботаже воздуха через каталитический раствор. После введения P<sub>4</sub> исходный синевато-зеленый раствор постепенно становился коричневатого-черным, а по мере поглощения кислорода опять зеленел. Общее количество каталитических циклов равнялось 26, время опыта — 20 ч. При вакуумной перегонке выделены дибутылфосфит (1 г; 11%) и трибутилфосфат (8.4 г; 70%). Белый дым оксидов фосфора над растворами отсутствовал. Синтез замедлялся по мере разбавления спирта ареном.

*Система FeCl<sub>3</sub>/O<sub>2</sub>/n-BuOH.* Раствор белого фосфора (1.4 г) в толуоле (60 мл) порционно по 4–5 мл добавляли в раствор FeCl<sub>3</sub> (4 г) в бутаноле (150 мл) при 80°C и постоянном барботаже воздуха через

каталитический раствор. Исходный светло-коричневый раствор после введения  $P_4$  стал темно-коричневым, а в результате регенерации кислородом воздуха опять светлел. Выпадения осадка не наблюдалось. Белый дым оксидов фосфора над раствором отсутствовал. Синтез замедлялся по мере разбавления спирта толуолом. Общее количество каталитических циклов равнялось 13, время опыта — 12 ч. Путем вакуумной дистилляции были выделены дибутилфосфит (1) (2.8 г; 32%) и трибутилфосфат (2) (7.1 г; 58%).

Выделенные эфиры фосфористой и фосфорной кислот идентифицировали комплексом физико-химических методов анализа. Полученные значения ИК-, ЯМР-спектроскопии и температуры кипения фосфорсодержащих продуктов соответствуют справочным данным.

Проведенные исследования показывают перспективность использования каталитического способа получения трибутилфосфата из желтого фосфора и бутилового спирта с использованием в качестве окислителя кислорода.

### Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что наибольшей каталитической активностью в реакции окислительного алкоксилирования желтого фосфора до эфиров кислот фосфора характеризуются соли меди при оптимальном отношении  $CuX_2/P_4$  5–10 и температуре 60°C. В бутанольных растворах галогенидов меди образуется преимущественно трибутилфосфат с выходом 84–100%, кислородсодержащие соли меди при высокой конверсии фосфора способствуют формированию дибутилфосфита. В присутствии хлоридов железа конверсия фосфора составляет 36–67%, увеличение температуры до 90°C повышает выход трибутилфосфата (91%). При использовании солей меди в растворах низкомолекулярных спиртов триалкилфосфаты формируются с высоким выходом при температуре 40–50°C. Парциальное давление кислорода существенно не влияет на процесс.

В оптимальных условиях проведены укрупненные лабораторные испытания каталитического синтеза трибутилфосфата. При использовании навески желтого фосфора 1.8 г проведено 36 циклов, выделено и идентифицировано 13.5 г трибутилфосфата.

### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики

Казахстан по проекту № AP05134152 «Новые фосфорсодержащие экстрагенты тяжелых металлов».

### Конфликт интересов

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

### Информация об авторах

*Бишимбаева Гаухар Козыкеевна*, д.х.н., проф., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8243-1124>

*Полимбетова Гульшара Сейтжановна*, д.х.н., проф., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1132-7450>

*Налибаева Арайлым Муратовна*, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3976-5134>

*Борангазиева Акбоне Камаловна*, к.х.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2671-9008>

*Ибраимова Жулдыз Уалханова*, к.х.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4877-3590>

*Жанабаева Асем Калдыбеккызы*, магистр, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4738-9012>

### Список литературы

- [1] Douglas S. Flett. // J. Organometal. Chem. 2005. V. 690. P. 2426–2438.
- [2] Росен А. М., Волк В. И., Бахрушин А. Ю., Захаркин Б. С., Карташева Н. А., Ларге Б. В., Николаева И. // Радиохимия. 1999. Т. 41. Вып. 3. С.205–212.
- [3] Rama R., Rout Alok, Venkatesan K. A., Antony M. P. // J. Electroanal. Chem. 2016. V. 771. P. 87–93.
- [4] Zhu Y., Jiao R., Wang S., Fan S., Liu B., Zheng H. S. Z., Chen S. // Proc. Int. Conf. ISEC'83. Aug 26–Sep. 2. 1983. Denver, CO. P. 9.
- [5] Trofimov B. A., Gusarova N. K. // Mendeleev Commun. 2009. V. 19. N 6. P. 295–302.
- [6] Gusarova N. K., Arbuzova S. N., Trofimov B. A. // Pure Appl. Chem. 2012. V. 84. N 3. P. 439–459.
- [7] Дорфман Я. А., Алешикова М. М., Полимбетова Г. С., Левина Л. В., Абдреимова Р. Р., Петрова Т. В., Дорошкевич Д. М. // Успехи химии. 1993. Т. 62. № 9. С. 928–948.
- [8] Abdreimova R. R., Faizova F. Kh., Akbayeva D. N., Polimbetova G. S., Aibasova S. M., Borangazieva A. K., Aliev M. B. // Euras. Chem.-Techn. J. 2002. V. 4. N 1. P. 11–17.
- [9] Abdreimova R. R., Akbayeva D. N., Polimbetova G. S., Caminade A.-M., Majoral J.-P. // Phosph., Sulf., Silic. 2000. V. 156. P. 239–254.
- [10] Ондаханов А. А., Ибраимова Ж. У., Полимбетова Г. С., Борангазиева А. К., Бугубаева Г. О. // Вестн. КБТУ. 2012. № 1 (20). С. 57–62.