

А. У. Аетов, К. В. Саерова, В. В. Бронская,  
Л. О. Рыбакова, А. А. Кабанов, Л. Л. Закирова

## ОКИСЛЕНИЕ СИСТЕМЫ «ВОДА-ФЕНОЛ-АЦЕТОН» В СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ФЛЮИДНЫХ УСЛОВИЯХ

*Ключевые слова:* сверхкритическое водное окисление, фенол, ацетон, химическое потребление кислорода, уксусная кислота.

Актуальность исследования обусловлена острой необходимостью разработки высокоэффективных и экологических методов обезвреживания высококонцентрированных сточных вод химических производств, таких как ПАО «Казаньоргсинтез». Традиционные методы очистки не обеспечивают полной деструкции токсичных органических соединений, представленных в данном исследовании фенолом и ацетоном, что приводит к устойчивому негативному воздействию на окружающую среду. Целью работы являлось комплексное изучение процесса сверхкритического водного окисления модельной системы «вода-фенол-ацетон» для определения оптимальных параметров глубокой очистки и оценки возможности селективного получения ценного химического продукта. Экспериментальный процесс проводили в непрерывном режиме в широком диапазоне температур 523–873 К и постоянном давлении 25 МПа с использованием кислорода воздуха в качестве окислителя (коэффициент избытка 10–30) и вариативным временем контакта 2 и 4 минуты. Эффективность процесса оценивали по динамике изменения ХПК, pH, общей степени конверсии и детальному составу продуктов реакции, определяемому методами ГХ-МС и кислотно-основного титрования. Установлено, что повышение температуры, времени реакции и коэффициента избытка кислорода приводит к значительному снижению ХПК с исходных 4808 мгО<sub>2</sub>/л до рекордных 94 мгО<sub>2</sub>/л, что соответствует степени конверсии до 98,3%. В мягких условиях (523 К, КИО=10, 2 мин) основным промежуточным продуктом окисления является уксусная кислота с максимальным выходом 74,91%. При жестких параметрах происходит полное минерализующее окисление органики до СО<sub>2</sub> и Н<sub>2</sub>О. Таким образом, технология СКВО доказала свою исключительную эффективность для глубокой очистки сложных промышленных стоков до строгих экологических нормативов. Дополнительно выявлена потенциальная возможность целевого получения уксусной кислоты как ценного продукта в мягких условиях, что придает технологии комплексную экономическую целесообразность и расширяет область ее практического применения.

А. U. Aetov, K. V. Saerova, V. V. Bronskaya,  
L. O. Rybakova, A. A. Kabanov, L. L. Zakirova

## OXIDATION OF THE WATER-PHENOL-ACETON SYSTEM UNDER SUPERCRITICAL FLUID CONDITIONS

*Keywords:* supercritical water oxidation, phenol, acetone, chemical oxygen demand, acetic acid.

The relevance of this study is driven by the acute need to develop highly efficient and environmentally friendly methods for the treatment of high-strength wastewater from chemical industries, such as PJSC "Kazanorgsintez". Conventional treatment methods fail to ensure the complete destruction of toxic organic compounds, represented in this study by phenol and acetone, leading to their persistent negative impact on the environment. The aim of this work was a comprehensive investigation of the supercritical water oxidation (SCWO) process of a model "water-phenol-acetone" system to determine the optimal parameters for advanced purification and to assess the possibility of selectively obtaining a valuable chemical product. The experimental process was conducted in a continuous-flow mode across a broad temperature range of 523–873 K and a constant pressure of 25 MPa, using air oxygen as the oxidant (excess oxygen ratio of 10–30) and variable residence times of 2 and 4 minutes. The process efficiency was evaluated based on the dynamics of changes in COD, pH, the overall conversion degree, and the detailed composition of the reaction products, determined by GC-MS and acid-base titration methods. It was established that an increase in temperature, reaction time, and excess oxygen ratio results in a significant reduction of COD from the initial 4808 mgO<sub>2</sub>/L to a record low of 94 mgO<sub>2</sub>/L, corresponding to a conversion degree of up to 98.3%. Under mild conditions (523 K, excess oxygen ratio=10, 2 min), the primary oxidation intermediate is acetic acid, with a maximum yield of 74.91%. Under severe parameters, complete mineralizing oxidation of organics to CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O occurs. Thus, SCWO technology has proven to be exceptionally effective for the advanced treatment of complex industrial effluents to meet stringent environmental standards. Additionally, the potential for the targeted production of acetic acid as a valuable product under mild conditions was identified, which adds comprehensive economic viability to the technology and expands its scope of practical application.

### Введение

Проблема очистки промышленных водных стоков в мире достаточно остра, а ее решение актуально, ввиду следующих причин [1–5]:

1. Защита окружающей среды: производственные сточные воды могут содержать опасные и загрязняющие вещества, такие как токсичные химические соединения, тяжёлые металлы,

нефтепродукты и другие вредные примеси. Выпуск неочищенных сточных вод в окружающую среду может привести к загрязнению водоемов, почвы и повреждению экосистем, а также негативно сказаться на здоровье человека и животных.

2. Соответствие законодательству и нормативным актам, нарушение которых может привести к штрафам, санкциям или даже закрытию

предприятия.

3. Экономическая эффективность: внедрение систем очистки сточных вод на производственных предприятиях может снизить затраты на покупку воды, так как очищенные сточные воды могут быть повторно использованы в производственных процессах.

4. Имидж компании: в последнее время потребители и инвесторы все более внимательно относятся к вопросам экологии, и предприятия, демонстрирующие заботу об окружающей среде, получают преимущество на рынке.

В Российской Федерации для очистки промышленных стоков применяется комплекс технологических методов, включая термическое сжигание, химическую и биологическую обработку, а также механическую фильтрацию. Несмотря на широкое распространение, данные подходы зачастую демонстрируют недостаточную эффективность в вопросах полного разрушения устойчивых органических соединений, содержащихся в сточных водах. Ярким примером этой проблемы являются стоки, образующиеся на производстве фенола и ацетона на предприятии «Бисфенол-А» (ПАО «Казаньоргсинтез») [6, 7]. Часть отходов здесь подвергается термическому обезвреживанию, а другая — в соответствии с действующими нормативами — после значительного разбавления водой сбрасывается в открытые водоемы. Подобная практика утилизации не только экономически невыгодна из-за высоких затрат, но и несет в себе существенные риски для экологии, обуславливая актуальность поиска новых, экологически безопасных методов глубокой переработки химических отходов.

Перспективным решением данной проблемы является технология сверхкритического водного окисления (СКВО), которая обеспечивает практически полную деструкцию органических загрязнителей до двуокиси углерода и воды. Ключевыми преимуществами СКВО выступают высокая скорость протекания реакций и минимальное воздействие на окружающую среду [8, 9]. Эффективность процесса, достигающая уровня полного разложения целевых соединений, находится в прямой зависимости от двух основных параметров: температуры и времени выдержки стоков в реакторе [10]. Согласно результатам исследований, для достижения степени окисления в 99,999% для большинства органических веществ необходим температурный режим на выходе из реактора в диапазоне 600–650 °C при времени контакта, составляющем *approximately* 5 секунд. Повышение температуры позволяет значительно сократить длительность пребывания субстрата в системе.

Эффективность СКВО была подтверждена в ходе многочисленных экспериментов по окислению фенола. В частности, в условиях трубчатого реактора при температурах 573–693 K и давлениях 18,8–27,8 МПа была успешно проведена обработка водных растворов фенола с временем реакции от 1,2 до 111 секунд. Анализ кинетики процесса позволил установить, что реакция имеет первый порядок по

фенолу и половинный — по кислороду, демонстрируя также зависимость от общего давления в системе. При моделировании реакции было выявлено, что при низких концентрациях фенола (порядка  $1\text{--}3 \times 10^{-5}$  моль/дм<sup>3</sup>) скорость его разложения прямо пропорциональна его собственной концентрации и концентрации кислорода в степени 0,4. В случае же повышенных концентраций (около 2%) в продуктах реакции фиксировались следы смолистых веществ, которые, однако, полностью исчезали при увеличении времени выдержки.

Отдельного внимания заслуживает вопрос катализа. Исследования активности и стабильности различных катализаторов ( $\text{MnO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CuO/Al}_2\text{O}_3$ ) в процессе непрерывного окисления фенола в течение более 100 часов показали, что все они в основном сохраняют свою функциональность. Однако катализатор на основе  $\text{CuO/Al}_2\text{O}_3$  продемонстрировал меньшую стабильность по сравнению с другими. Наилучшие результаты были отмечены для  $\text{MnO}_2$ , который проявил себя как высокоактивный и стабильный катализатор, обеспечивающий полное окисление фенола и сохраняющий свою эффективность на протяжении длительного времени.

Свойства, которые делают сверхкритическую воду хорошей реакционной средой, также являются недостатком процесса. Реактивная химия, которая является преимуществом систем СКВО, может привести к износу реактора, особенно если обрабатываемые соединения содержат гетероатомы (атомы, отличные от H, C, N или O) [11, 12]. Галогены особенно реакционноспособны, и обработка любого галогенсодержащего соединения потребует специального материала и/или конструкции реактора для уменьшения коррозии. При СКВО гетероатомы обычно образуют соответствующие неорганические кислоты (например, Cl образует HCl), и часто к сырью добавляют сильное основание для нейтрализации этих кислот и уменьшения коррозии [13, 14].

Указанный фактор оказывает существенное влияние на конечную стоимость внедрения технологии, в связи с чем, ключевым этапом становится отработка процесса на модельных растворах. Такой подход позволяет с высокой точностью определить оптимальные параметры проведения реакции, минимизируя финансовые затраты на испытания. В рамках данного исследования для моделирования органической составляющей реальных сточных вод производства «Бисфенол-А» ПАО «Казаньоргсинтез» была выбрана трёхкомпонентная система «вода-фенол-ацетон». Эксперименты по её окислению проводились в условиях сверхкритического водного окисления с использованием в качестве окислителя атмосферного кислорода, что позволило оценить эффективность и практическую применимость метода СКВО для деструкции сложных многокомпонентных смесей.

### Экспериментальная часть

Состав модельного концентрированного стока ПАО «Казаньоргсинтез» использовался следующий:

5,9 % масс. фенола; 14 % масс. ацетона; 80,1 % масс. бидистиллята воды.

В качестве материалов были использованы:

– фенол, ЧДА: ТУ 6-09-40-3245-90;

– ацетон, ЧДА: ГОСТ 2603-79;

– вода, полученная в стеклянном бидистилляторе (тип БС) (бидистиллят:  $n_D^{25}=1,3329$ ,  $\rho=997,1$  кг/м<sup>3</sup>).

Окисление проведено на установке непрерывного действия с проточным реактором, подробное описание принципа действия которой описано в работах [15, 16]. В качестве окислителя использован кислород воздуха. Количество окислителя, подаваемого в систему, задавалось с определенным избытком, который рассчитывался как соотношение фактической концентрации кислорода (содержащегося в воздухе) к его стехиометрическому количеству. Последнее определялось исходя из значения химического потребления кислорода (ХПК) для исследуемой модельной жидкости.

Для количественной оценки эффективности протекания процесса окисления был применен стандартизированный показатель — химическое потребление кислорода (ХПК). Данный параметр является ключевым для анализа уровня загрязнения сточных вод и промышленных стоков органическими соединениями. Измерения значений ХПК проводились на специализированном анализаторе «Эксперт-003-ХПК» фотометрическим методом [17]. В качестве дополнительного показателя измерялось значение pH. Контроль активности pH ионов водорода в потоке реагируемой жидкости осуществлялся с помощью анализатора ионного состава «ПАИС 01рН» [18].

Степень превращения процесса СКВО определялась по формуле:

$$X = 1 - \frac{ХПК_{\kappa}}{ХПК_{\eta}}, \quad (1)$$

где  $ХПК_{\eta}$ ,  $ХПК_{\kappa}$  — показатели химического потребления кислорода до и после реакции окисления в водной среде в СКФ условиях, мгО<sub>2</sub>/л.

Аналитическое определение качественного и количественного состава продуктов, образовавшихся в результате процесса окисления, выполнялось методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием (ГХ-МС). Исследования проводились на хромато-масс-спектрометрической системе Agilent 6890N/5973 (США), оборудованной капиллярной колонкой HP-5MS со следующими характеристиками: длина — 30 м, внутренний диаметр — 0,25 мм, толщина неподвижной фазы — 0,25 мкм.

Для обеспечения эффективного разделения компонентов смеси был применен следующий температурный градиент: изначально колонка термостатировалась при 40 °С в течение 5 минут, после чего температура программируемо повышалась со скоростью 10 °С в минуту до конечного значения в 300 °С, где поддерживалась в течение 20 минут. В качестве газа-носителя использовался гелий, скорость потока которого была установлена на уровне 0.6 мл/мин.

Отбор проб объемом 0.1 мкл производился без предварительного разведения в режиме разделения потока (сплит) с коэффициентом 1:5. Температура в интерфейсе составляла 300 °С. Масс-спектрометрическое детектирование осуществлялось в диапазоне масс от 29 до 800 атомных единиц массы, а общая продолжительность анализа одной пробы достигала 51 минуты. Процесс ионизации образца проходил методом электронного удара с энергией ионизирующих электронов 70 эВ. Температура источника ионов была установлена на отметке 230 °С.

Определение содержания побочного продукта реакции окисления - уксусной кислоты проводилось с применением метода кислотно-основного титрования. Сырьем для титрования служили полученные продукты окисления, дистиллированная вода, индикатор фенолфталеин и раствор NaOH концентрацией 0,1 н.

Титрование уксусной кислоты основано на реакции:



Выбор индикатора для титрования уксусной кислоты обусловлен тем, что в точке эквивалентности реакция среды является щелочной. Это связано с процессом гидролиза образовавшейся в ходе реакции соли — ацетата натрия. В связи с этим для надежной фиксации конечной точки титрования был использован индикатор фенолфталеин, изменяющий окраску в щелочной среде.

Методика количественного анализа заключалась в следующем: в коническую колбу вместимостью 25 мл вносили 1 мл анализируемого продукта окисления (аликвотную часть). К исследуемому образцу добавляли 20 мл дистиллированной воды и две капли спиртового раствора фенолфталеина. Полученную смесь титровали раствором гидроксида натрия с молярной концентрацией эквивалента 0,1 моль/л (0,1 н.) до момента появления устойчивой бледно-розовой окраски, сохраняющейся не менее 30 секунд. По объему рабочего раствора щелочи, израсходованному на титрование, проводили расчеты.

Для обеспечения статистической достоверности результатов титрование каждого образца проводили в трех параллельных опытах. На основании полученных данных вычисляли средний объем раствора NaOH, пошедший на титрование, и затем, руководствуясь законом эквивалентов, рассчитывали концентрацию уксусной кислоты в исследуемом растворе:

$$C = \frac{C_{\text{NaOH}} \cdot V_{\text{NaOH}}}{V_{\text{аликвоты}}}, \quad (3)$$

где  $V_{\text{NaOH}}$  — средний объем раствора NaOH, прошедший на титрование, мл;  $C_{\text{NaOH}}$  — концентрация NaOH, 0.1 н;  $V_{\text{аликвоты}}$  — объем аликвоты исследуемого образца, равный 1 мл.

Далее рассчитывали молярную массу эквивалента уксусной кислоты, содержащейся в аликвоте, по формуле:

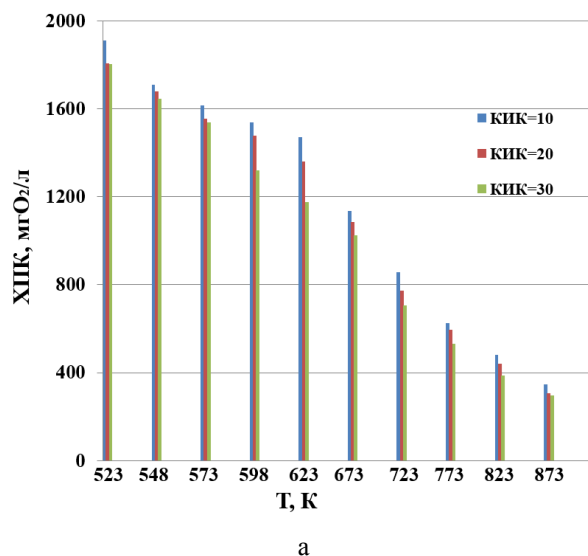
$$M_{\text{эkv}} = C \cdot 60,052, \quad (4)$$

где 60,052 – молярная масса уксусной кислоты, г/моль.

Затем, с учетом начального содержания органических соединений в окисляемой жидкости, определяли какая часть этой органической составляющей прореагировала с образованием уксусной кислоты в качестве целевого продукта.

### Результаты и обсуждение

Окисление модельной жидкости проводилось в широком диапазоне температур от 523 до 873 К при постоянном давлении 25 МПа. Параметры процесса



варьировались по коэффициенту избытка кислорода (КИК) в интервале от 10 до 30 и по продолжительности реакции ( $\tau$ ), которая составляла 2 и 4 минуты. Перед началом основных экспериментов был выполнен предварительный анализ исходной модельной жидкости, в ходе которого измерены значения ХПК и pH (ХПК = 4808,33 мгО<sub>2</sub>/л; pH = 8,1). На рисунке 1 представлены результаты по определению ХПК для всего массива экспериментальных данных в зависимости от температуры, КИК и длительности процесса.

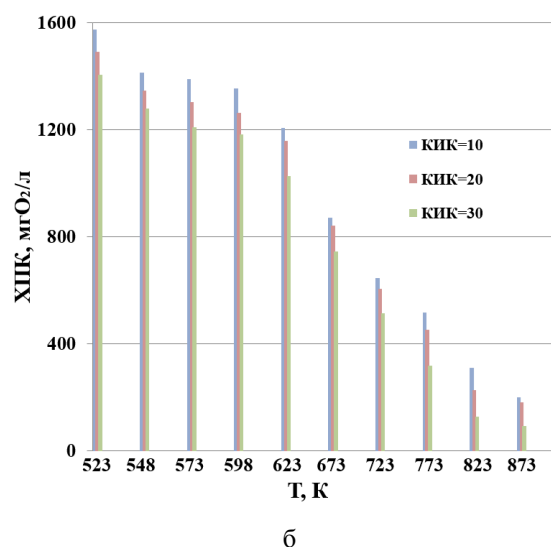


Рис. 1 – Показатель ХПК (мгО<sub>2</sub>/л) продукта реакции окисления, полученного при  $P = 25$  МПа в зависимости от температуры, КИК при длительности реакции: а – 2 мин; б – 4 мин

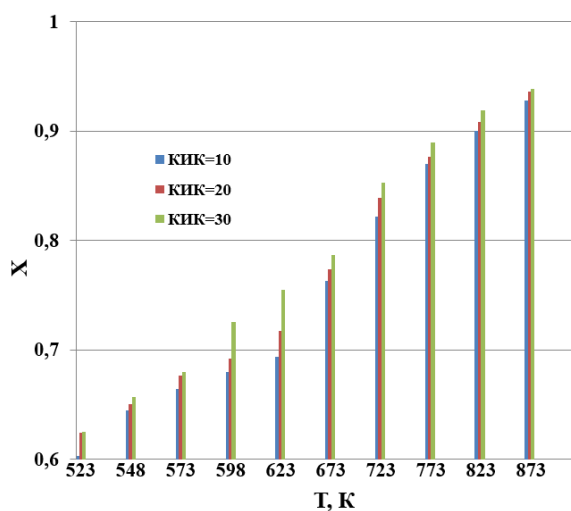
Fig. 1 – COD (mgO<sub>2</sub>/L) of the oxidation reaction product obtained at  $P = 25$  MPa depending on temperature, oxygen excess coefficient (OEC) at reaction duration: a – 2 min; b – 4 min

Из рисунка можно увидеть, что с увеличением температуры, КИК и длительности реакции показатель ХПК неизменно падает. ХПК падает со значений 1910 до 295 мгО<sub>2</sub>/л после двух минут реакции; с 1576 до 94 мгО<sub>2</sub>/л после четырех минут реакции. По сравнению с исходной жидкостью ХПК снижается примерно в 51 раз (с 4808 до 94 мгО<sub>2</sub>/л). Анализ зависимости значений ХПК от температуры эксперимента демонстрирует выраженный скачкообразный характер процесса окисления. Наблюдается, что в области температур до 673 К скорость снижения химического потребления кислорода относительно невелика. Однако при превышении этого температурного порога эффективность деструкции органических соединений резко возрастает, что проявляется в интенсивном падении показателя ХПК. Данный скачкообразный характер процесса обусловлен фазовым переходом в сверхкритическое состояние основного компонента реакционной среды – воды, что кардинально меняет физико-химические свойства системы и значительно интенсифицирует процесс окисления.

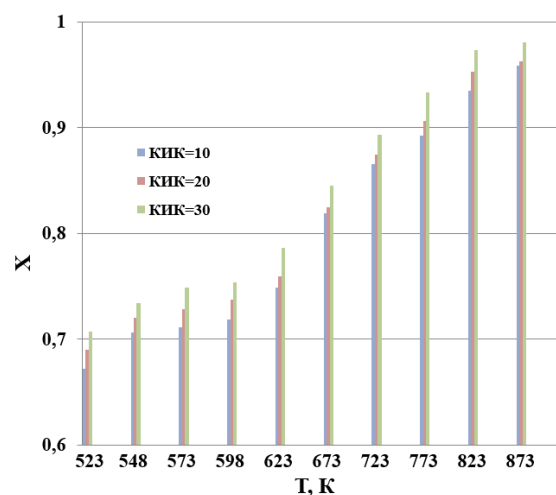
Важным практическим результатом исследования является соответствие состава очищенной жидкости после обработки в сверхкритических условиях экологическим нормативам. Полученные значения ХПК утилизированной жидкости не превышают установленного предела в 1000 мгО<sub>2</sub>/л, что позволяет рассматривать ее как техническую воду соответствующего качества.

На рис. 2 представлена эффективность (степень превращения) модельной жидкости, рассчитанная по формуле (1).

Анализ кинетики процесса выявил, что максимальная степень превращения, достигающая значения 0,983, наблюдается при наиболее жестких условиях проведения процесса: температуре 873 К, коэффициенте избытка кислорода (КИК) 30 и продолжительности реакции ( $\tau$ ) 4 минуты. Данный режим характеризуется наибольшей динамикой и эффективностью деструкции органических компонентов.



а



б

Рис. 2 – Эффективность процесса (X) продукта реакции окисления, полученного при  $P = 25$  МПа в зависимости от температуры, КИК при длительности реакции: а – 2 мин; б – 4 мин

Fig. 2 – Process efficiency (X) of the oxidation reaction product obtained at  $P = 25$  МПа depending on temperature, OEC at reaction duration: а – 2 min; б – 4 min

Контроль кислотности среды в ходе окисления показал существенное изменение водородного показателя. Значение pH исходной модельной жидкости составляло 8,1, что соответствует слабощелочной реакции среды. После проведения процесса окисления pH полученного продукта снизился до 6,0, приближаясь к нейтральным значениям. Это смещение кислотно-основного баланса свидетельствует о глубоком протекании

реакций окисления, в результате которых щелочные компоненты исходной смеси были эффективно нейтрализованы.

На основании ХПК выборочно произведен хроматографический анализ продуктов окисления, полученных при щадящих условиях проведения реакции (табл. 1) для оценки снижения ароматических соединений из модельной жидкости.

Таблица 1 – Относительное содержание компонентов в образце продуктов реакции без учета воды

Table 1 – Relative content of components in the reaction product sample, excluding water

Образец Соединение	№ 1 ( $T = 523$ К; КИК = 10; $\tau = 2$ мин)		№ 2 ( $T = 523$ К; КИК = 30; $\tau = 2$ мин)		№ 3 ( $T = 548$ К; КИК = 10; $\tau = 2$ мин)	
	Время выхода, мин	Площадь, %	Время выхода, мин	Площадь, %	Время выхода, мин	Площадь, %
Ацетон	2,286	20,1	2,309	71,6	2,282	44,7
Уксусная кислота	2,431	79,6	2,509	27,1	2,350	55,0
Фенол	8,767	0,3	11,058	1,4	11,217	0,3

Как видно из таблицы 1 в процессе окисления обнаружен промежуточный продукт реакции – уксусная кислота. Чем ниже температура процесса и КИК, тем выше процент содержания уксусной кислоты от всей органики в продукте реакции без учета воды.

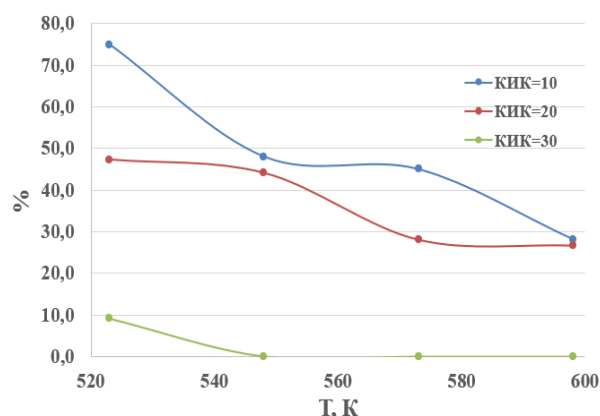
На основании обнаружения уксусной кислоты по хроматографическому анализу произведено титрование для расчета конверсии исходных органических соединений в системе «вода-фенол-ацетон», моделирующей органическую составляющую концентрированного водного стока завода Бисфенол-А ПАО «Казаньоргсинтез», в уксусную кислоту в продукте реакции.

На рис. 3 представлена конверсия органической

составляющей модельной жидкости в уксусную кислоту для реакции, осуществленной в диапазоне температур 523÷598 К, давлении 25 МПа, при КИК 10÷30 за 2 мин проведения реакции. При проведении опытов по окислению тройной системы за 4 мин проведения реакции в полученных образцах уксусная кислота не была обнаружена.

Из рис. 3 видно, что максимальная конверсия, равная 74,91 %, была достигнута при  $T = 523$  К, КИК = 10 за 2 мин проведения реакции. При увеличении температуры происходит дальнейшее окисление органической составляющей сточных вод с образованием более простых соединений, при этом выход уксусной кислоты снижается. Отметим также, что увеличение КИК до 30 приводит к существенной

окисляемости органики на более простые соединения на фоне практически нулевой конверсии ее в уксусную кислоту.



**Рис. 3 – Конверсия органической составляющей модельной жидкости в уксусную кислоту в зависимости от температуры процесса и КИК при длительности реакции**

**Fig. 3 – Conversion of the organic component of the model liquid into acetic acid depending on the process temperature and OEC during the reaction duration**

### Заключение

Проведено окисление трехкомпонентной системы «вода-фенол-ацетон», служащей моделью органической составляющей концентрированных сточных вод производства Бисфенол-А ПАО «Казаньоргсинтез». Процесс осуществлялся в непрерывном режиме в следующих диапазонах параметров: температура 523–873 К, давление 25 МПа, коэффициент избытка кислорода (КИК) 10–30, длительность реакции 2 и 4 минуты. В результате окисления отмечено значительное снижение концентрации ароматических кислородсодержащих соединений в сточной воде.

Наименьшее значение показателя ХПК, составившее 94 мгО<sub>2</sub>/л, зафиксировано в условиях максимальной интенсивности процесса: при температуре 873 К, давлении 25 МПа, КИК = 30 и времени обработки 4 минуты. Эффективность очистки в данных условиях достигла 0,983.

При минимальных параметрах процесса (Т = 523 К, Р = 25 МПа, КИК = 10, τ = 2 мин) идентифицирован побочный продукт реакции – уксусная кислота, демонстрирующая при указанных условиях максимальную конверсию 74,91%.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду (проект №22-19-00117-П) за финансовую поддержку исследования.

### Литература

1. Y. V. Anikin, V. I. Shilkov. *Russ. J. Constr. Sci. Technol.* **4**, 2, 22–26 (2018).
2. A. M. Dregulo, A. M. Khodachek, M. K. Awasthi. *Sustain.*

- Water Resour. Manag.* **11**, 2, 1–15 (2025).
3. Z. Mingaleva et al. *Sustainability*, **12**, 1, 94 (2019).
4. K. M. Nahiun et al. *Sci. Rev.* **7**, 3, 20–31 (2021).
5. K. Jain et al. *Molecules* **26**, 6, 1797 (2021).
6. А.Р. Габитова, А.У. Аетов, З.И. Зарипов и др. *Экология и промышленность России* **29**, 2, 42–48 (2025).
7. Ф.М. Гумеров, З.И. Зарипов, С.В. Мазанов и др. *Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика* **17**, 4, 3–11 (2022).
8. А.У. Аетов, Ю.Д. Мельник, Н.С. Гаврилов. *Вестник технологического университета* **26**, 4, 24–28 (2023)
9. А.У. Аетов, Ю.Д. Мельник, Н.С. Гаврилов. *Вестник технологического университета* **26**, 4, 33–37 (2023)
10. А.У. Аетов. *Вестник технологического университета* **28**, 1, 107–112 (2025)
11. H. Lei et al. *Green Chem.* **27**, 31, 9357–9413 (2025).
12. S. S. T. Allam et al. *Environmental Hydrocarbon Pollution and Zero Waste Approach Towards a Sustainable Waste Management*, 105–126 (2025).
13. Y. Guo, D. Xu, S. Wang. *Hydrothermal Processing of Biomass for Hydrogen and Bio-oil Production*, 13–59 (Springer Nature Singapore, Singapore, 2025).
14. C. A. Riggins. *Supercritical Water Oxidation: Testing Of Aqueous Wastewater Solutions For Space Applications* (2023).
15. С.В. Мазанов, А.У. Аетов. *Вестник технологического университета* **28**, 3, 64–67 (2025)
16. С.В. Мазанов, А.У. Аетов, Р.А. Усманов и др. *Russ. J. Phys. Chem.* **13**, 7, 1131–1134 (2019).
17. Д.О. Цымбал. *Проблемы здоровья и экологии*, **20**, 2, 108–114 (2023)
18. В.А. Казанин и др. *Разработка измерительного комплекса для исследования уровня pH воды при помощи беспилотного летательного аппарата: дипломная работа (проект) специалиста по направлению подготовки: 11.05.01-Радиоэлектронные системы и комплексы* (2024)

### References

1. Y. V. Anikin, V. I. Shilkov. *Russ. J. Constr. Sci. Technol.* **4**, 2, 22–26 (2018).
2. A. M. Dregulo, A. M. Khodachek, M. K. Awasthi. *Sustain. Water Resour. Manag.* **11**, 2, 1–15 (2025).
3. Z. Mingaleva et al. *Sustainability*, **12**, 1, 94 (2019).
4. K. M. Nahiun et al. *Sci. Rev.* **7**, 3, 20–31 (2021).
5. K. Jain et al. *Molecules*, **26**, 6, 1797 (2021).
6. A. R. Gabitova, A. U. Aetov, Z. I. Zaripov et al. *Ecol. Ind. Russ.* **29**, 2, 42–48 (2025).
7. F. M. Gumerov, Z. I. Zaripov, S. V. Mazanov et al. *Supercrit. Fluids: Theory Pract.* **17**, 4, 3–11 (2022).
8. A. U. Aetov, Yu. D. Melnik, N. S. Gavrilov. *Herald of Technological University*. **26**, 4, 24–28 (2023).
9. A. U. Aetov, Yu. D. Melnik, N. S. Gavrilov. *Herald of Technological University*. **26**, 4, 33–37 (2023).
10. A. U. Aetov. *Herald of Technological University*. **28**, 1, 107–112 (2025).
11. H. Lei et al. *Green Chem.* **27**, 31, 9357–9413 (2025). DOI: 10.1039/D5GC02162F
12. S. S. T. Allam et al. *Environ. Hydrocarbon Pollut. Zero Waste Approach Sustain. Waste Manag.*, 105–126 (Springer, Cham, 2025).
13. Y. Guo, D. Xu, S. Wang. *Hydrothermal Process. Biomass Hydrogen Bio-oil Prod.*, 13–59 (Springer Nature Singapore, Singapore, 2025).
14. C. A. Riggins. *Supercrit. Water Oxid.: Test. Aq. Wastewater Solut. Space Appl.* (2023).
15. S. V. Mazanov, A. U. Aetov. *Herald of Technological University*. **28**, 3, 64–67 (2025)

16. S.V. Mazanov, A.U. Aetov, R.A. Usmanov et al. *Russ. J. Phys. Chem.* **13**, 7, 1131–1134 (2019).  
17. D.O. Tsymal. *Probl. Health Ecol.* **20**, 2, 108–114 (2023).

18. V.A. Kazanin et al. *Development Meas. Complex Study Water pH Using UAV: Spec. Diploma Proj., Dir.* 11.05.01 – Radioelectron. Syst. Complexes (2024).

---

© **А. У. Аетов** – старший преподаватель кафедры Теоретических основ теплотехники (ТОТ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, aetovalmaz@mail.ru; **К. В. Саерова** – доцент кафедры Архитектуры и дизайна, КНИТУ, senya97@inbox.ru; **В. В. Бронская** – доцент кафедры Процессов и аппаратов химической технологии, КНИТУ, dweronika@mail.ru; **Л. О. Рыбакова** – студент группы 4121-42 кафедры Химической технологии переработки нефти и газа (ХТПНГ), КНИТУ, rybka.lan@yandex.ru; **А. А. Кабанов** – студент группы 431-24 кафедры ХТПНГ, КНИТУ, KabanovAA@corp.knrtu.ru; **Л. Л. Закирова** – студент группы 251-M041 кафедры ТОТ, КНИТУ, ZakirovaLL@corp.knrtu.ru.

© **A. U. Aetov** – Senior Lecturer, Department of Theoretical Foundations of Heat Engineering (TFHE), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, aetovalmaz@mail.ru; **K. V. Saerova** – Associate Professor of the Department of Architecture and Design, KNRTU, senya97@inbox.ru; **V. V. Bronskaya** – Associate Professor of the Department of Processes and Apparatuses of Chemical Engineering, KNRTU, dweronika@mail.ru; **L.O. Rybakova** – Student of group 4121-42 of the Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing (CTOGP), KNRTU, rybka.lan@yandex.ru; **A. A. Kabanov** – Student of group 431-24 of the CTOGP department, KNRTU, KabanovAA@corp.knrtu.ru; **L. L. Zakirova** – Student of group 251-M041 of the TFHE department, KNRTU, ZakirovaLL@corp.knrtu.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 28.08.25.

Дата принятия рукописи в печать – 03.12.25.