

## Оценка эффективности пероксида кальция в процессе удаления фосфат-ионов из сточных вод

© 2025. Т. С. Смирнова<sup>1,2</sup>, к. т. н., доцент,  
Д. А. Гуськов<sup>3</sup>, начальник участка очистных сооружений,

А. А. Алексеев<sup>1</sup>, аспирант,

<sup>1</sup>РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина,  
119991, Россия, г. Москва, просп. Ленинский, д. 65, корп. 1,

<sup>2</sup>ФГАУ НИИ «Центр экологической промышленной политики»,  
115054, Россия, г. Москва, Стремянный переулок, д. 38,

<sup>3</sup>Муниципальное унитарное предприятие  
«Тепло Коломны объединённые инженерные системы»,  
140411, Россия, г. Коломна, просп. Кирова, д. 64,  
e-mail: smirnova.ts@gubkin.ru

Среди известных на сегодняшний день методов удаления фосфат-ионов из сточных вод реагентные методы являются одними из наиболее перспективных. Вместе с тем, внесение в процессе очистки сточных вод дополнительных реагентов может привести к вторичному загрязнению воды. В связи с этим, поиск новых эффективных и безопасных реагентов для удаления фосфат-ионов из сточных вод является актуальной исследовательской задачей. В работе была изучена возможность применения пероксида кальция для удаления фосфат-ионов из хозяйственно-бытовых сточных вод на примере очистных сооружений города Коломны. Эффективность удаления фосфат-ионов из сточных вод с применением пероксида кальция составила 90%. Также была установлена зависимость изменения значения показателя химического потребления кислорода (ХПК) от концентрации пероксида кальция в сточной воде: при добавлении в сточные воды пероксида кальция с концентрацией 500 мг/дм<sup>3</sup> величина ХПК снижалась более чем в 3 раза.

**Ключевые слова:** пероксид кальция, очистка сточных вод, фосфат-ионы, дефосфотация, реагентная очистка.

## Assessment of the calcium peroxide efficiency for removing phosphates from wastewater

© 2025. T. S. Smirnova<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-7328-3254<sup>1</sup>

D. A. Guskov<sup>3</sup> ORCID: 0009-0007-8499-1815<sup>2</sup>

A. A. Alekseev<sup>1</sup> ORCID: 0009-0009-3227-7753<sup>3</sup>

<sup>1</sup>National University of Oil and Gas "Gubkin University",  
65, Leninsky Avenue, Moscow, Russia, 119991,

<sup>2</sup>Federal State Autonomous Institution Research Institute  
"Center for Environmental Industrial Policy",  
38, Stremyanny pereulok, Moscow, Russia, 115054,

<sup>3</sup>Municipal Unitary Enterprise "Teplo Kolomna United Engineering Systems",  
64, Kirova Avenue, Kolomna, Russia, 140411,  
e-mail: smirnova.ts@gubkin.ru

The standard for the phosphate ions (phosphorus) content in the discharge of treated wastewater into surface water bodies was established in the Russian Federation only in 1991. This standard for treated wastewater disposal into fishery waters is 0.2 mg/L. According to numerous studies, the average concentration of phosphorus phosphates entering surface waters along with wastewater is about 1.57 mg/L. This value exceeds the established standard by more than 7 times. Due to the fact that phosphorus is the main biogenic element (along with carbon and nitrogen) its increased content can lead to eutrophication of the surface waters. Therefore, the search for effective solutions to the phosphate ions removal during wastewater treatment is relevant. The main methods for removing phosphate ions from wastewater are biological, chemical (reagent) methods and complex biological-chemical methods. Reagent methods are the most promising. At the same time, the adding of auxiliary reagents during wastewater treatment can lead to secondary pollution. Therefore, the

search for new effective and safe reagents for phosphate ions removing from wastewater is a currently important research issue. The paper presents the results of a study on the possibility of using calcium peroxide to remove phosphate ions from domestic wastewater, case-study of Kolomna treatment facilities. The received efficiency of phosphate ions removing phosphate ions from wastewater using calcium peroxide was nearly 90%. The dependence of changes in the chemical oxygen demand value on the concentration of calcium peroxide in wastewater was also determined.

**Keywords:** calcium peroxide, wastewater treatment, phosphate ions, dephosphorization, reagent treatment.

Норматив содержания фосфат-ионов (по фосфору) при отведении очищенных сточных вод в поверхностные водные объекты был установлен в Российской Федерации только в 1991 г. При отведении очищенных сточных вод в объекты рыбохозяйственного назначения он составляет 0,2 мг/дм<sup>3</sup>. Авторами исследований [1, 2] установлено, что среднее значение концентрации фосфора фосфатов, поступающего в поверхностные водные объекты в составе сточных вод, составляет около 1,57 мг/дм<sup>3</sup>, что превышает установленный норматив более чем в 7 раз. Данные по превышению норматива взяты для очистных сооружений г. Москвы до 2005 г., с последующим отведением сточных вод в р. Москву, которая является объектом рыбохозяйственного назначения [2]. Наряду с углеродом и азотом фосфор является одним из основных биогенных элементов, поэтому его повышенное содержание может привести к эвтрофикации водоёма, в который отводится очищенная сточная вода. В связи с этим поиск эффективных решений по удалению фосфат-ионов из сточных вод в процессе их очистки является актуальной задачей.

Основными методами удаления фосфат-ионов из сточных вод (методами дефосфатации) являются биологические, химические (реагентные) и комплексные химико-биологические [3].

Биологическая очистка сточных вод от соединений фосфора представляет собой удаление биогенного элемента в процессе деструкции высокомолекулярных соединений, содержащих связанный фосфор, и переводе последнего в легкодоступные для биологических объектов ортофосфат-ионы ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). При поступлении сточных вод на биологическую очистку соотношение связанных форм полифосфатов к свободным формам ортофосфат-ионов составляет примерно 1:3, после биодеструкции это соотношение становится прямо противоположным. Несмотря на многие достоинства биологических методов (применение биологических объектов, отсутствие вторичного загрязнения), необходимая степень очистки при их использовании без модификации достигается не всегда [3].

Основу удаления фосфат-ионов химическими (реагентными) методами составляют реакции образования нерастворимых соединений фосфат-ионов с некоторыми металлами, что впоследствии приводит к хлопьеобразованию и седиментации взвеси на дно реактора, в котором проводилась очистка. Из литературных данных известно применение в качестве реагентов удаления фосфат-ионов из сточных вод соединений магния, сульфата алюминия и гидроксида кальция [4–6].

Относительно новым реагентом, мало изученным в направлении очистки сточных вод от фосфат-ионов, является пероксид кальция. Данный реагент способен образовывать нерастворимые соединения с различными фосфат-ионами.

Пероксид кальция обладает сильными окислительными свойствами, что даёт возможность проверить его эффективность в удалении не только фосфат-ионов, но и снижении показателя химического потребления кислорода (ХПК) сточных вод [7].

Цель исследования заключалась в определении эффективности применения пероксида кальция в качестве реагента для снижения содержания фосфатов-ионов в сточных водах на примере очистных сооружений города Коломны.

## Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования был выбран боковой поток, а именно надиловый водосток очистных сооружений г. Коломны.

В процессе исследования были установлены зависимости изменений показателя pH, величины ХПК от концентрации пероксида кальция, а также эффективность удаления фосфат-ионов (по фосфору) из сточных вод. Полученные результаты приведены с доверительным интервалом, при расчёте которого был использован t-критерий Стьюдента при  $P=0,95$ .

Все химико-аналитические исследования проводили в лаборатории кафедры промышленной экологии РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. Концентрации фосфат-ионов в сточной воде были определены

Таблица 1 / Table 1

Основные реакции, протекающие при добавлении различных реагентов для удаления фосфат-ионов из сточных вод / Basic reactions occurring when adding different reagents for phosphate ions removing from wastewater

Реагент Reagent	Целевые реакции Main reactions
$Al_2(SO_4)_3$	$Al_2(SO_4)_3 + 2H_3PO_4 = 2AlPO_4 + 3H_2SO_4$ (1)
	$3Al^{3+} + 2PO_4^{3-} + 3H_2O = (AlOH)_3(PO_4)_2 + 3H^+$ (2)
	$Al^{3+} + PO_4^{3-} = AlPO_4$ (3)
	$Al^{3+} + 3H_2O = Al(OH)_3 + 3H^+$ (4)
MgO	$3Mg^{2+} + 2PO_4^{3-} = Mg_3(PO_4)_2$ (5)
	$Mg^{2+} + PO_4^{3-} + NH_4^+ = MgNH_4PO_4$ (6)
Ca(OH) <sub>2</sub>	$Ca(OH)_2 + HCO_3^- = CaCO_3 + H_2O + OH^-$ (7)
	$5Ca^{2+} + 4OH^- + 3HPO_4^{2-} = Ca_5OH(PO_4)_3 + 3H_2O$ (8)
	$3Ca^{2+} + 2PO_4^{3-} = Ca_3(PO_4)_2$ (9)
	$Ca^{2+} + 2H_2PO_4^- = Ca(H_2PO_4)_2$ (10)
CaO <sub>2</sub>	$CaO_2 + 2H_2O = Ca(OH)_2 + H_2O_2$ (11)
	$Ca(OH)_2 + HCO_3^- = CaCO_3 + H_2O + OH^-$ (12)
	$5Ca^{2+} + 4OH^- + 3HPO_4^{2-} = Ca_5OH(PO_4)_3 + 3H_2O$ (13)
	$3Ca^{2+} + 2PO_4^{3-} = Ca_3(PO_4)_2$ (14)
	$Ca^{2+} + 2H_2PO_4^- = Ca(H_2PO_4)_2$ (15)

фотометрическим методом в соответствии с методикой ПНД Ф 14.1:2.4.112-97. Определение величины ХПК проводилось фотометрическим методом в соответствии с методикой ПНД Ф 14.1:2.4.210-2005. Значения показателя рН определяли потенциометрическим методом в соответствии с РД 52.24.495-2017.

Необходимая концентрация металлов для удаления фосфат-ионов из сточных вод определялась из уравнений химических реакций (табл. 1). В работе [1] была получена оптимальная концентрация сульфата алюминия, составившая 12 мг/дм<sup>3</sup>. Такое количество алюминия позволяет снизить концентрацию фосфат-ионов в сточных водах до следовых значений, при исходном содержании фосфат-ионов 27,1 мг/дм<sup>3</sup>. Процесс удаления фосфат-ионов из сточных вод с применением сульфата алюминия протекает в соответствии с реакциями 1–4 (табл. 1). В работе [1] также отмечено, что осаждение фосфат-ионов посредством сульфата алюминия возможно только в диапазоне значений рН, равном 4,0–7,3. Следует отметить, что величина рН ниже 6,5 не соответствует нормативному значению показателя при отведении очищенных сточных вод в поверхностные водные объекты. Введение сернокислого алюминия перед аэротенком приводит к аккумуля-

ляции алюминия в избыточном активном иле, что негативно сказывается на интенсивности работы микробиоценоза активного ила. Наличие алюминия в осадке сточных вод снижает возможности применения осадка в качестве мелиоранта или рекультиванта [8, 9].

Было исследовано [10], что добавление к сульфату алюминия четыреххлористого титана позволяет интенсифицировать процесс очистки, однако в промышленности такой приём не применяется.

Использование оксида магния для удаления фосфат-ионов в некоторых работах определяется как перспективное направление [5, 6]: достигается высокая эффективность очистки, относительно низкая стоимость реагента. Однако имеются и недостатки применения магнийсодержащих реагентов: оптимальный диапазон рН составляет 11,0–12,0, необходимо подкисление очищенных сточных вод перед водоотведением; в конкурирующую реакцию за магний-катионы могут вступать аммоний-катионы, что делает процесс менее селективным. Целевые реакции протекающего процесса (реакции 5 и 6) приведены в таблице 1.

Стехиометрический расчёт показывает, что на удаление 1 г фосфора из сточных вод требуется порядка 1,16 г магния. Таким об-

разом, при перерасчёте на хлорид магния получается 4,59 г соли.

Реагенты на основе кальция являются наиболее предпочтительными при очистке сточных вод от фосфат-ионов, потому что кальций не является токсическим веществом, а также способен образовывать нерастворимые соли со всеми видами фосфат-ионов (ортофосфат-, гидрофосфат-, дигидрофосфат-ионы). Наиболее изученным реагентом в направлении удаления фосфат-ионов из сточных вод является гидроксид кальция (реакции 7–10 в таблице 1) [10–12]. Его применение характеризуется высокой эффективностью очистки [13]. Реагент доступен, имеет относительно низкую стоимость. Из недостатков можно отметить отсутствие дополнительного коагулирующего эффекта в сравнении с соединениями алюминия и магния и необходимость поддерживать величину водородного показателя более 9,5.

Согласно работе [10], на удаление 1 г фосфора расходуется 1,29 г кальция, что в пересчёте на гидроксид кальция составляет 2,39 г.

В отличие от других реагентов, кальцийсодержащие вещества помимо прямого осаждения фосфат-ионов способны адсорбировать на себе различные полифосфатные соединения. Совместное действие процесса химического осаждения и процесса адсорбции приводит к интенсификации процесса очистки сточных вод от фосфат-ионов. В исследовании [8] было отмечено, что выпадение ортофосфатов в осадок происходит при величине pH свыше 9,5.

Несмотря на установленные в работах [5–12] эффективные концентрации реагентов, необходимо учитывать, что относительное непостоянство состава сточных вод и возможность протекания конкурирующих реакций может привести к увеличению

расхода реагентов в реальных условиях процесса очистки сточных вод на очистных сооружениях.

При внесении пероксида кальция в сточные воды возможно протекание реакций 11–15 (табл. 1) [7]. Реакция 11 интенсивно протекает при температуре +50 °С, остальные реакции – при нормальных условиях. Реакции 12–15 аналогичны реакциям взаимодействия гидроксида кальция с фосфат-ионами. Однако, одним из преимуществ пероксида кальция является образование при растворении пероксида водорода, который обладает сильными окислительными свойствами. При окислении органических загрязняющих веществ в сточных водах увеличивается биодоступность продуктов реакций на этапе биологической очистки сточных вод [14].

## Результаты и обсуждение

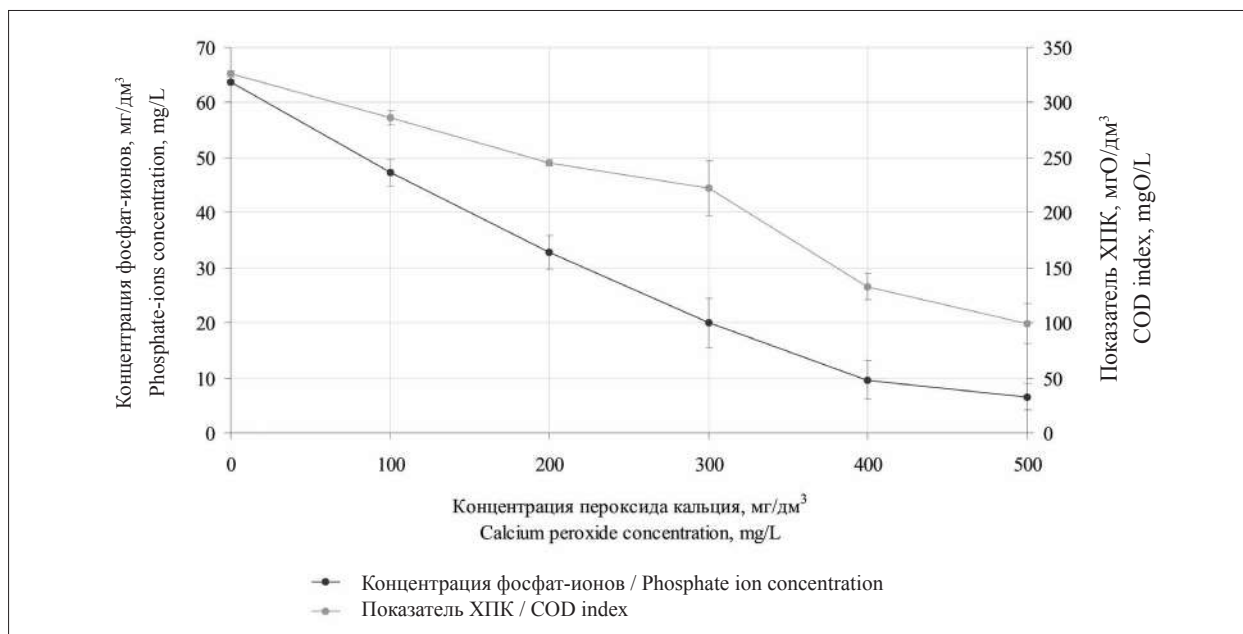
В процессе анализа литературных данных было выявлено, что растворение пероксида кальция в воде наиболее эффективно при температуре +50 °С. Поэтому при данной температуре в эксперименте для удаления фосфат-ионов из сточных вод был приготовлен раствор пероксида кальция, содержащий 1% действующего вещества. В таблице 2 приведены результаты эксперимента по снижению концентрации фосфат-ионов в сточных водах в зависимости от концентрации добавленного пероксида кальция.

Анализ полученных результатов показывает (табл. 2), что пероксид кальция является достаточно эффективным реагентом для удаления фосфат-ионов из сточных вод.

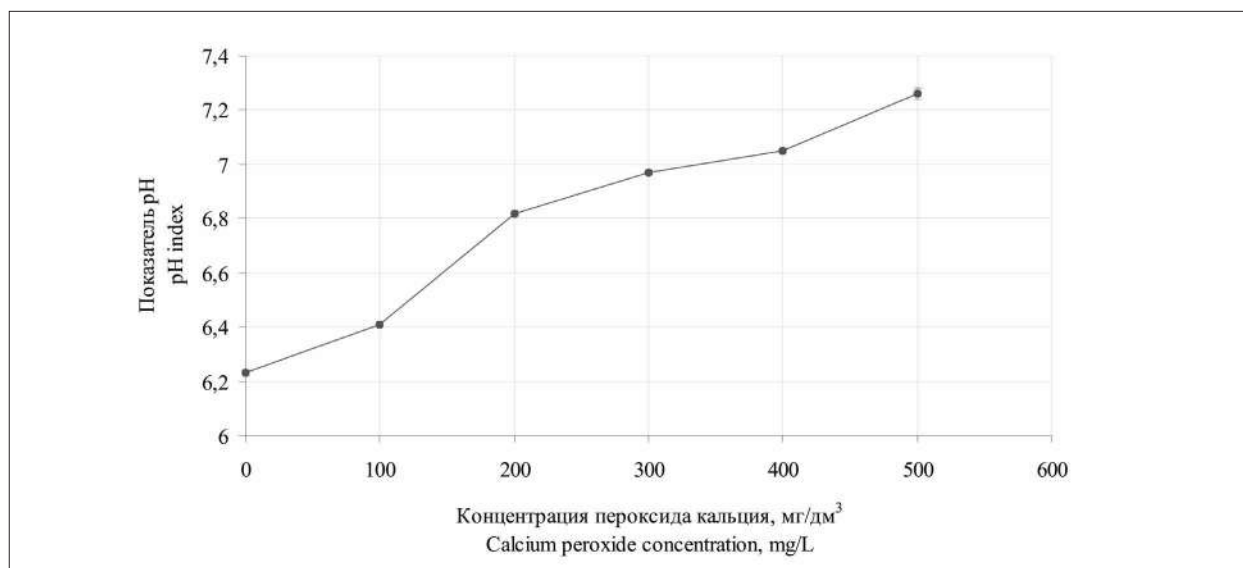
На рисунке 1 приведена зависимость снижения концентрации фосфат-ионов и показателя ХПК от концентрации перок-

Эффективность удаления фосфат-ионов из сточных вод при различных концентрациях пероксида кальция / Efficiency of removing phosphate ions from wastewater at different concentrations of calcium peroxide

Концентрация пероксида кальция, мг/дм <sup>3</sup> Calcium peroxide concentrations, mg/L	Концентрация фосфат-ионов, мг/дм <sup>3</sup> Phosphate ions concentrations, mg/L	Концентрация фосфора фосфатов, мг/дм <sup>3</sup> Phosphorus concentrations, mg/L	Эффективность удаления фосфат-ионов, % Phosphate ions removal efficiency, %
0	63,8±0,3	20,84±0,09	0
100	47,2±2,4	15,4±0,8	25,97±1,30
200	32,8±3,1	10,7±1,0	48,7±2,4
300	20±4	6,5±1,5	68,8±3,4
400	9,6±3,5	3,1±1,2	85±4
500	6,5±2,4	2,1±0,7	90±5



**Рис. 1.** Зависимость изменения концентрации фосфат-ионов и показателя ХПК в сточных водах от концентрации внесённого пероксида кальция  
**Fig. 1.** Dependence of phosphate ions concentration and chemical oxygen demand (COD) on calcium peroxide concentration added to wastewater



**Рис. 2.** Зависимость величины показателя pH от концентрации внесённого в сточные воды пероксида кальция / **Fig. 2.** Dependence of pH on the concentration of calcium peroxide added in wastewater

сида кальция, внесённого в виде раствора в сточные воды.

При внесении в сточную воду пероксида кальция в концентрации 500 мг/дм<sup>3</sup> величина показателя ХПК уменьшается более чем в 3 раза (рис. 1).

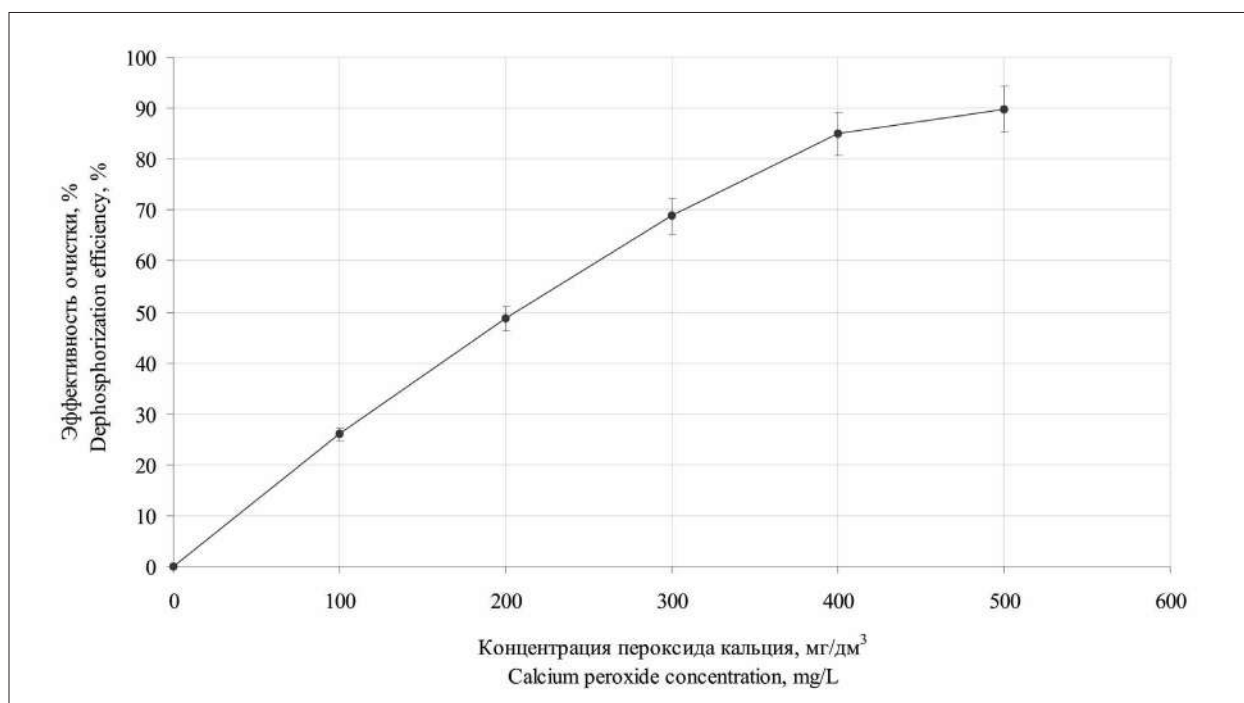
При осаждении фосфатов с использованием кальцийсодержащих реагентов важно контролировать значение показателя pH для того, чтобы соли фосфорной кислоты были устойчивы и хорошо выпадали в осадок. Также необходимо

контролировать уровень водородного показателя с тем, чтобы его значения не выходили за нормативно установленные для отведения очищенной сточной воды в поверхностные водные объекты.

Зависимость изменения показателя pH от концентрации внесённого в сточные воды пероксида кальция приведена на рисунке 2.

Из рисунка 2 видно, что изменение показателя pH при внесении пероксида кальция в сточную воду находится в диапазоне 6,41–7,26,





**Рис. 3.** Зависимость эффективности удаления фосфат-ионов от концентрации внесённого в сточную воду пероксида кальция  
**Fig. 3.** Dependence of the phosphate ions removing efficiency on the concentration of calcium peroxide added in wastewater

что соответствует нормативному значению для отведения очищенных сточных вод в поверхностные водные объекты.

На рисунке 3 приведены данные об изменении степени очистки сточных вод от фосфат-ионов при использовании разных концентраций пероксида кальция.

Эксперимент по установлению эффективности удаления фосфат-ионов из сточных вод посредством внесения раствора пероксида кальция в работе завершён на значении примерно 90% (табл. 2), что соответствует снижению концентрации фосфат-ионов в исследуемых сточных водах с 63,76 мг/дм³ до 6,53 мг/дм³ при концентрации пероксида кальция 500 мг/дм³ (рис. 3).

### Закключение

Поскольку объектом исследования был выбран боковой водный поток, подающийся перед аэротенком в составе очистных сооружений, цель эксперимента ставилась как снижение концентрации фосфат-ионов в сточных водах до значений, определяемых на входе очистных сооружений (30–35 мг/дм³).

Полученные результаты исследования позволяют сделать вывод о перспективности применения пероксида кальция для удаления фосфат-ионов из сточных вод. При этом получается дополнительный эффект снижения

значения показателя ХПК, который также нормируется в очищенных сточных водах, направляемых на отведение в поверхностные водные объекты, до значения 99 мгО/дм³.

Внедрение предлагаемого метода очистки сточных вод позволит снизить антропогенную нагрузку на поверхностные водные объекты при сбросе в них сточных вод, что, в свою очередь, замедлит процессы эвтрофикации, протекающие при поступлении в водные объекты биогенных элементов.

### Литература

1. Колова А.Ф., Пазенко Т.Я., Чудинова Е.М. Реагентное удаление фосфатов из сливных вод // Вестник ИрГТУ. 2013. № 10. С. 161–164.
2. Харьковина О.В. Эффективная эксплуатация и расчёт сооружений биологической очистки сточных вод. Волгоград: Панорама, 2015. 422 с.
3. Келль О.А., Фадеева О.Ю. Практическое применение метода химического удаления фосфатов при использовании различных преципитантов на сооружениях очистки хозяйственно-бытовых сточных вод // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2017. № 2. С. 142–151. doi: 10.15593/2409-5125/2017.02.12
4. Плешаков Н.А., Беликов М.Л., Сафарян С.А. Очистка воды от фосфат-ионов с применением различных реагентов // Труды Кольского научного центра РАН.

Серия: Технические науки. 2023. Т. 14. № 5. С. 60–66. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.5.011

5. Guan H. Efficient simultaneous removal of phosphorus and copper from wastewater by an iron-enhanced dolomite process // *Water Air Soil Pollut.* 2023. V. 234. Article No. 776. doi: 10.1007/s11270-023-06805-8

6. Сапон Е.Г., Марцуль В.Н. Очистка возвратных потоков очистных сооружений от фосфатов обожженным доломитом // *Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология.* 2017. № 1. С. 106–113.

7. Гладышев Н.Ф., Гладышева Т.В., Лемешева Д.Г., Путин Б.В., Путин С.Б., Дворецкий С.И. Пероксидные соединения кальция. Синтез. Свойства. Применение. М.: Спектр, 2013. 216 с.

8. Yin Q., Liu M., Ren H. Removal of ammonium and phosphate from water by Mg-modified biochar: influence of Mg pretreatment and pyrolysis temperature // *BioResources.* 2019. V. 14. No. 3. P. 6203–6218. doi: 10.15376/biores.14.3.6203-6218.

9. Смирнова Т.С., Гуськов Д.А., Вишневский В.Д. Использование отходов водоподготовки для удаления фосфатов из сточных вод // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе.* 2024. № 2. С. 13–21.

10. Кузин Е.Н. Титансодержащие коагулянты в процессах очистки хозяйственно-бытовых сточных вод // *Вода и экология: проблемы и решения.* 2020. № 4. С. 16–23. doi: 10.23968/2305-3488.2020.25.4.16-23

11. Pantoja F., Sukmana H., Beszédes S., László Z. Removal of ammonium and phosphates from aqueous solutions by biochar produced from agricultural waste // *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 2023. V. 25. P. 1921–1934. doi: 10.1007/s10163-023-01687-8

12. Теплых С.Ю., Бочков Д.С., Базарова А.О. Исследование способов удаления фосфатов из бытовых сточных вод // *Градостроительство и архитектура.* 2020. Т. 10. № 4. С. 69–77. doi: 10.17673/Vestnik.2020.04.9.

13. Тураев Д.Ю., Почиталкина И.А. Комплексная переработка отходов обогащения фосфатных руд // *Теоретическая и прикладная экология.* 2021. № 4. С. 148–153. doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-148-153

14. Zhong C., Fu J., Jiang T., Zhang C., Cao G. Polyphosphate metabolic gene expression analyses reveal mechanisms of phosphorus accumulation and release in *Microbacterium phosphovorans* strain JN459 // *FEMS Microbiol. Lett.* 2018. V. 365. No. 6. Article No. fny034. doi: 10.1093/femsle/fny034

## References

1. Kolova A.F., Pazenko T.Ya., Chudinova E.M. Phosphate reagent removal from waste water // *Proceedings of Irkutsk State Technical University.* 2013. No. 10. P. 161–164 (in Russian).

2. Kharkina O.V. Effective operation and calculation of biological wastewater treatment facilities. Volgograd: Panorama, 2015. 433 p. (in Russian).

3. Kell O.A., Fadeeva O.Yu. Practical application of the method of chemical removal of phosphates using various precipitants at domestic wastewater treatment facilities // *PNRPU Bulletin. Applied ecology. Urban development.* 2017. No. 2. P. 142–151 (in Russian). doi: 10.15593/2409-5125/2017.02.12

4. Pleshakov N.A., Belikov M.L., Safaryan S.A. Purification of water from phosphate ions using various reagents // *Transactions of the Kola Science Center of RAS. Series: Engineering Sciences.* 2023. V. 14. No. 5. P. 60–66. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.5.011

5. Guan H. Efficient simultaneous removal of phosphorus and copper from wastewater by an iron-enhanced dolomite process // *Water Air Soil Pollut.* 2023. V. 234. Article No. 776. doi: 10.1007/s11270-023-06805-8

6. Sapon E.G., Martsul V.N. Purification of return flows of treatment facilities from phosphates with burnt dolomite // *Proceedings of BSTU. Issue 2, Chemical engineering, biotechnology, geoecology.* 2017. No. 1. P. 106–113 (in Russian).

7. Gladyshev N.F., Gladysheva T.V., Lemesheva D.G., Putin B.V., Putin S.B., Dvoretzky S.I. Calcium peroxide compounds. Synthesis. Properties. Application. Moskva: Spectrum, 2013. 216 p. (in Russian).

8. Yin Q., Liu M., Ren H. Removal of ammonium and phosphate from water by Mg-modified biochar: influence of Mg pretreatment and pyrolysis temperature // *BioResources.* 2019. V. 14. No. 3. P. 6203–6218. doi: 10.15376/biores.14.3.6203-6218

9. Smirnova T.S., Guskov D.A., Vishnevsky V.D. Use of water treatment wastes for phosphates removal from wastewater // *Environmental Protection in the Oil and Gas Complex.* 2024. No. 2. P. 13–21 (in Russian).

10. Kuzin E.N. Titanium-based coagulants in domestic wastewater treatment // *Water and Ecology: Problems and Solutions.* 2020. No. 4. P. 16–23 (in Russian). doi: 10.23968/2305-3488.2020.25.4.16-23

11. Pantoja F., Sukmana H., Beszédes S., László Z. Removal of ammonium and phosphates from aqueous solutions by biochar produced from agricultural waste // *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 2023. V. 25. P. 1921–1934. doi:10.1007/s10163-023-01687-8

12. Teplykh S.Yu., Bochkov D.S., Bazarova A.O. Study of methods for removing phosphates from domestic wastewater // *Urban construction and architecture.* 2020. V. 10. No. 4. P. 69–77 (in Russian). doi: 10.17673/Vestnik.2020.04.9

13. Turaev D.Yu., Pochitalkina I.A. Complex processing of phosphatic ores enrichment waste // *Theoretical and Applied Ecology.* 2021. No. 4. P. 148–153 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-148-153

14. Zhong C., Fu J., Jiang T., Zhang C., Cao G. Polyphosphate metabolic gene expression analyses reveal mechanisms of phosphorus accumulation and release in *Microbacterium phosphovorans* strain JN459 // *FEMS Microbiol. Lett.* 2018. V. 365. No. 6. Article No. fny034. doi: 10.1093/femsle/fny034