

# ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 628.16

DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-6-167-178

*С.В. МАКСИМОВА<sup>1</sup>, С.М. САЛМИН<sup>2</sup>, Е.Ю. ОСИПОВА<sup>3</sup>, Б.Р. БОКИЕВ<sup>4</sup>,*

*<sup>1</sup>Тюменский индустриальный университет,*

*<sup>2</sup>Пензенский государственный университет*

*архитектуры и строительства,*

*<sup>3</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет,*

*<sup>4</sup>Таджикский технический университет им. академика М.С. Осими*

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА КОАГУЛЯЦИИ ПРИМЕСЕЙ ВОДЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КРУПНОЗЕРНИСТОЙ КОНТАКТНОЙ ЗАГРУЗКИ**

В статье приведены теоретические и экспериментальные исследования процесса коагуляции твёрдых минеральных примесей воды при её перемешивании с раствором коагулянта – сернокислого алюминия (СА) в слое контактной однородной загрузки с крупностью зерен 10, 30 и 50 мм. Показано, что значения градиента скорости и критерия Кэмпбелла, которые наряду с дозой коагулянта определяют эффективность хлопьеобразования, являются функциями от величины удельной поверхности порового пространства крупнозернистой загрузки. Произведена экспериментальная сравнительная оценка эффективности коагуляции природной воды с частицами каолининовой глины объёмной концентрацией  $(1,11-1,15)10^{-4}$  при её перемешивании с раствором СА с помощью механической мешалки в свободном объёме, а также в слое крупнозернистой загрузки по эффекту осветления при последующем отстаивании обработанной воды.

**Ключевые слова:** коагуляция примесей; перемешивание; градиент скорости; критерий Кэмпбелла; крупнозернистая контактная загрузка; отстаивание; эффект осветления.

**Для цитирования:** Максимова С.В., Салмин С.М., Осипова Е.Ю., Бокиев Б.Р. Оценка эффективности процесса коагуляции примесей воды при использовании крупнозернистой контактной загрузки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 6. С. 167–178.

S.V. MAKSIMOVA<sup>1</sup>, S.M. SALMIN<sup>2</sup>, E.Yu. OSIPOVA<sup>3</sup>, B.R. BOKIEV<sup>4</sup>,  
<sup>1</sup>Tyumen State Oil and Gas University,  
<sup>2</sup>Penza State University of Architecture and Construction,  
<sup>3</sup>Tomsk State University of Architecture and Building,  
<sup>4</sup>Technological University of Tajikistan

## EFFICIENCY OF WATER IMPURITY COAGULATION WITH COARSE-GRAINED CONTACT BED

The paper describes theoretical and experimental studies of solid mineral water impurity coagulation during mixing with aluminum sulfate coagulant solution in the contact bed with the grain size of 10, 30 and 50 mm. It is shown that the values of velocity gradient and Camp criterion, which together with coagulant dose determine the flocculation efficiency, are functions of the specific surface area of pore space of the coarse-grained bed. A comparison of the efficiency of coagulating natural water containing kaolinite clay particles in the amount of  $(1.11-1.15)10^{-4}$  is given when mixing with aluminum sulfate solution by means of a mechanical mixer in a free volume and in coarse-grained bed clarification at a subsequent precipitation of treated water.

**Keywords:** coagulation, mixing, velocity gradient, Camp criterion, coarse-grained contact bed, precipitation, clarification.

**For citation:** Maksimova S.V., Salmin S.M., Osipova E.Yu., Bokiev B.R. Otsenka effektivnosti protsessy koagulyatsii primesei vody pri ispol'zovanii krupnozernistoi kontaktnoi zagruzki [Efficiency of water impurity coagulation with coarse-grained contact bed]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2018. V. 20. No. 6. Pp. 167–178.

### Введение

Важнейшим условием успешной коагуляции водных примесей является накопление в объёме обрабатываемой воды нерастворимой твёрдой фазы хлопьевидных продуктов гидролиза коагулянта. Обработка накопленных экспериментальных материалов [1–3] позволяет предположить, что необходимыми условиями для коагуляции являются:

1. Адсорбция частиц взвеси продуктами гидролиза коагулянта для обеспечения высокой степени вероятности их слипания при столкновениях.
2. Накопление в объёме обрабатываемой воды достаточно большого количества твёрдой фазы для обеспечения формирования крупных быстро оседающих хлопьев.

Выполнение первого условия обеспечивает дестабилизацию частиц загрязнений, а выполнение второго – благоприятные условия коагуляции в отношении кинетики хлопьеобразования, которое характеризуется двумя противоположно направленными процессами: формированием хлопьев за счёт слипания дестабилизированных частиц и механическим разрушением хлопьев при их перемещениях и столкновениях.

Значительную роль для кинетики хлопьеобразования играет режим перемешивания коагулянта с обрабатываемой водой, содержащей твердые примеси. Представление о выборе оптимального режима перемешивания основа-

но на работах [4–6], в которых Кэмп (Т. Camp) предложил характеризовать работу смесительных сооружений величиной градиента скорости  $G$ ,  $\text{с}^{-1}$

$$G = \sqrt{\frac{W}{\mu}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\nu}}, \quad (1)$$

где  $W$  – удельная мощность, затрачиваемая на перемешивание единицы объема воды с реагентом,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $\varepsilon_1$  – диссипация энергии за единицу времени, отнесенная к единице массы среды,  $\text{м}^2/\text{с}^3$ ;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Чрезмерно интенсивное перемешивание приводит к разбиванию образующихся хлопьев и ухудшению качества очищенной воды. При перемешивании воды с коагулянтами в свободном объеме оптимальные значения градиента скорости рекомендованы в пределах  $110 < G < 450 \text{ с}^{-1}$  [7] в целях обеспечения низких затрат энергии вместе с требуемым качеством очистки воды.

Так как время  $\tau$  пребывания воды в смесительном устройстве также влияет на формирование хлопьев, Кэмп ввел безразмерный критерий  $G\tau$ , характеризующий энергию, затрачиваемую на перемешивание.

По данным различных исследователей, средние значения критерия Кэмп для смесителей составляют  $5 \cdot 10^3 - 1,8 \cdot 10^4$  [2, 3, 6].

Однако экспериментальные исследования показали, что чрезмерно интенсивное и длительное перемешивание воды в свободном объеме смесителя может привести к разбиванию микрохлопьев, резкому ухудшению адгезионных свойств взвеси и замедлению последующего хлопьеобразования [2, 8].

Одним из перспективных способов интенсификации процесса агломерации примесей является контактная коагуляция в турбулентном режиме на крупнозернистой загрузке, состоящей из щебня или гравия с крупностью зерен более 10 мм, обладающей низким гидравлическим сопротивлением [9].

Известно [10], что при турбулентном фильтровании обработанной коагулянтном загрязнённой воды сопротивление крупнозернистой загрузки в течение первых 2,5–5 ч растёт, а потом стабилизируется и в дальнейшем не изменяется при заданной скорости фильтрования воды, что соответствует предельной насыщенности (заилению) порового пространства загрузки осадком.

Осадок, образующийся в поровых каналах крупнозернистого фильтрующего слоя, представляет собой агломераты хлопьев, частично прикреплённых за счёт сил адгезии к поверхности зерен загрузки.

В состоянии предельной насыщенности осадком порового пространства концентрация хлопьев, поступающих вместе с исходной водой и раствором коагулянта в слой контактной крупнозернистой загрузки, становится равной концентрации хлопьев, выходящих из слоя [10, 11]. Таким образом, на зёрнах загрузки происходит процесс контактной коагуляции без осветления воды в отличие от фильтров или контактных осветлителей, работающих в режиме ламинарного фильтрования.

Градиент скорости при контактной коагуляции в зернистом слое [12]

$$G_c = \sqrt{\frac{\rho \cdot \nu \cdot i}{m \cdot \nu}}, \text{ с}^{-1}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность воды,  $\text{кг/м}^3$ ;  $v$  – скорость фильтрования,  $\text{м/с}$ ;  $i$  – гидравлический уклон в слое загрузки;  $m$  – пористость слоя.

В табл. 1 приведены значения  $G_c$  и удельной поверхности пор  $\omega$  для диапазона скоростей фильтрования  $0,03 < v < 0,12$   $\text{м/с}$ , диаметров однородной загрузки из щебня 10, 30 и 50 мм с пористостью в состоянии предельного насыщения осадками порового пространства  $0,34 < m < 0,37$  при объемной концентрации хлопьев в воде  $C_0 = (0,7-2,0)10^{-4}$  [12].

Таблица 1

**Величины градиента скорости и удельной поверхности крупнозернистой загрузки при различных значениях скорости фильтрования**

Скорость фильтрования $v$ , $\text{м/с}$	Градиент скорости $G_c$ , $\text{с}^{-1}$ удельная поверхность пор $\omega$ , $\text{м}^{-1}$		
	$d = 10$ мм	$d = 30$ мм	$d = 50$ мм
0,03	159/390	87/130	65/78
0,05	323/387	176/129	133/77,4
0,08	617/384	338/128	255/76,8
0,12	1080/381	590/127	446/76,2

Анализ данных табл. 1 показывает, что влияние  $\omega$  на величину градиента скорости в крупнозернистом слое при турбулентном фильтровании убывает с увеличением скорости фильтрования и крупности зерен загрузки.

В настоящей работе были поставлены следующие задачи экспериментальных исследований:

- сравнение эффективности осветления мелкодисперсной водной суспензии после её перемешивания с коагулянтом двумя способами: в свободном объеме и в толще крупнозернистой загрузки;
- оценка влияния удельной поверхности порового пространства (крупности зерен) фильтрующей контактной загрузки и режима перемешивания воды с коагулянтом на глубину осветления воды;
- сравнение доз коагулянта, требуемых для достижения одинаковой эффективности осветления воды отстаиванием при двух рассматриваемых способах её предварительного перемешивания с реагентом.

### Материалы и методы

Объектом исследования являлась маломутная речная вода. Для замутнения воды применяли тонкоизмельчённую каолинитовую глину с крупностью частиц менее  $0,5 \cdot 10^{-3}$  мм. Объемная концентрация взвешенных частиц  $C_0$  поддерживалась на уровне  $(1,1-1,15)10^{-4}$ . Температура воды составляла 19–20 °С, щелочность находилась в пределах 2,1–2,4 ммоль/л.

Эксперименты проводились на лабораторной установке, включающей в себя контактную камеру с крупнозернистой загрузкой, камеру с механической мешалкой (механический смеситель) и емкости для отстаивания загрязнённой воды, обработанной коагулянтом. Исходная вода с замутнителем од-

новременно подавалась в контактную камеру и механический смеситель, где смешивалась с раствором коагулянта – сульфатом алюминия (СА) концентрацией 10 % и содержанием активной части ( $Al_2O_3$ ) 16 % по массе.

Контактная камера представляла собой колонну высотой 2,8 м и внутренним диаметром 100 мм, работающую в безнапорном режиме. В качестве крупнозернистой контактной загрузки использовался однородный гранитный щебень крупностью зерен 10, 30 и 50 мм. Высота загрузки  $H$  составляла от 0,5 до 2,0 м, скорость фильтрования коагулируемой воды в колонне изменялась от 0,03 до 0,12 м/с.

Время контакта  $\tau$  раствора коагулянта с водой в толще крупнозернистой загрузки при её различной высоте  $H$  для диапазона скоростей фильтрования  $0,03 < v < 0,12$  м/с показано в табл. 2.

Таблица 2

Время контакта  $\tau$  при различных значениях  $H$  и  $v$ 

Высота загрузки $H$ , м	Время контакта $\tau$ , с, при скорости фильтрования			
	$v = 0,03$ м/с	$v = 0,05$ м/с	$v = 0,08$ м/с	$v = 0,12$ м/с
0,5	6,0–6,2	3,6–3,7	2,2–2,3	1,4–1,5
1,0	12,0–12,3	7,1–7,3	4,3–4,5	2,8–3,0
2,0	24,0–24,6	14,2–14,6	8,6–9,0	5,6–6,0

Градиент скорости для контактной камеры определялся по табл. 1. Для механического смесителя скоростной градиент находился по формуле (1) и в процессе экспериментов изменялся в пределах от 90 до  $300 \text{ с}^{-1}$ . Время перемешивания воды с коагулянтом в объёме механического смесителя варьировалось от 30 до 180 с. Отобранные после механического смесителя и контактной камеры опытные пробы воды переливались в стеклянные емкости (цилиндры) и отстаивались в течение 60 мин.

Эффективность коагуляции, т. е. скорость образования крупных хорошо оседающих хлопьев, оценивалась по эффекту осветления воды при её отстаивании после смешения с коагулянтом

$$E = \frac{C_0 - C}{C_0}, \quad (3)$$

где  $C_0$  и  $C$  – соответственно концентрации твёрдой фазы в исходной воде и воде после отстаивания, отобранной из верхней части цилиндра.

Концентрации твёрдой фазы в воде определялись фотометрическим методом.

### Результаты и обсуждение

На рис. 1 и 2 представлены результаты исследований по осветлению воды отстаиванием после её смешения с коагулянтом СА в свободном объёме при помощи механической мешалки. Дозы коагулянта  $D_c$  в экспериментах изменялись от 30, до 140 мг/л, однако при дозах СА выше 100 мг/л эффект осветления увеличивался незначительно.

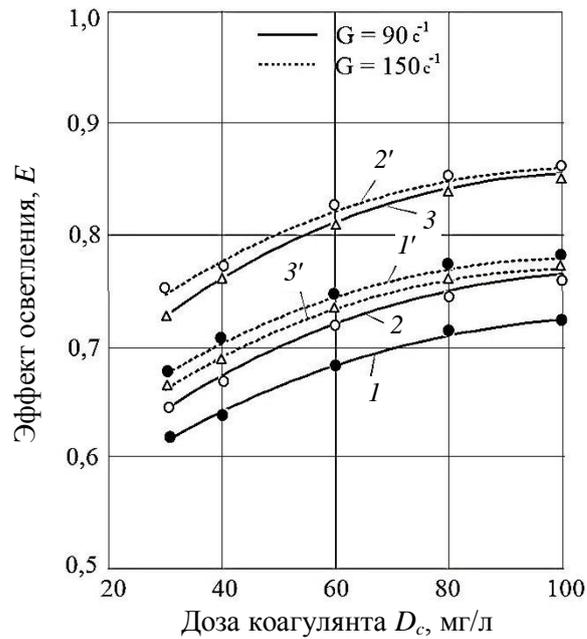


Рис. 1. График зависимости эффекта осветления воды после отстаивания от доз коагулянта для значений градиента скорости  $G = 90$  и  $150 \text{ с}^{-1}$  при времени перемешивания  $\tau$  в механическом смесителе:

1 и 1' —  $\tau = 30$  с; 2 и 2' —  $\tau = 60$  с; 3 и 3' —  $\tau = 120$  с

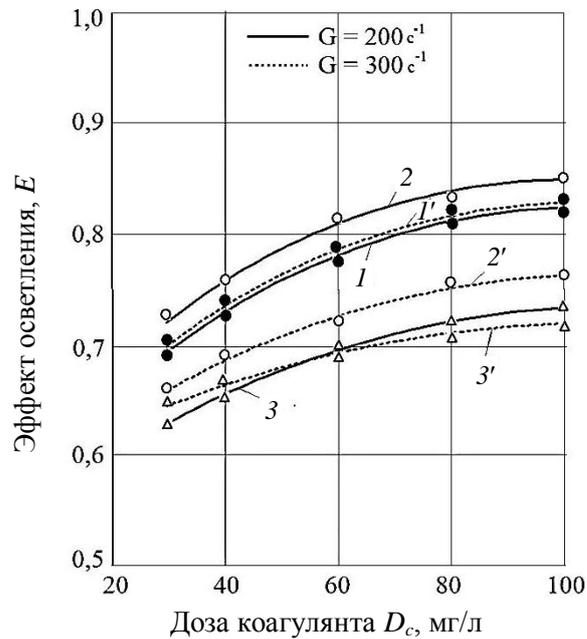


Рис. 2. График зависимости эффекта осветления воды после отстаивания от доз коагулянта для значений градиента скорости  $G = 200$  и  $300 \text{ с}^{-1}$  при времени перемешивания  $\tau$  в механическом смесителе:

1 и 1' —  $\tau = 30$  с; 2 и 2' —  $\tau = 60$  с; 3 и 3' —  $\tau = 120$  с

Анализ графиков показывает, что при использовании механической мешалки наиболее благоприятные условия для образования хорошо оседающих коагуляционных структур с эффектом осветления  $E \geq 0,82$  обеспечивались при критерии Кэмпса  $G\tau = (0,9-1,2)10^4$ , а рекомендуемое значение градиента скорости находилось в пределах  $200 \text{ с}^{-1}$ .

На рис. 3–8 представлены результаты лабораторных исследований по осветлению воды отстаиванием после её перемешивания с коагулянтом СА в слое крупнозернистой загрузки высотой 0,5, 1,0 и 2,0 м. Градиент скорости  $G_c$  в зависимости от диаметра  $d$  или удельной поверхности  $\omega$  загрузки изменялся в пределах от 65 до  $1080 \text{ с}^{-1}$  (см. табл. 1). Дозы коагулянта  $D_c$ , так же, как и в экспериментах с механическим перемешиванием, варьировались от 30 до 100 мг/л.

Время контакта воды с коагулянтом в слое загрузки высотой  $H = 0,5$  м при скоростях фильтрования  $v = 0,03-0,12 \text{ м/с}$  составляло от 1,4 до 6,2 с (см. табл. 2).

Графики зависимостей  $E = f(D_c)$  для крупнозернистой загрузки с  $H = 0,5$  м показаны на рис. 3 и 4.

Недостаточное время контакта и, соответственно, малые значения критерия Кэмпса ( $G_c\tau < 1,7 \cdot 10^3$ ) при перемешивании воды с коагулянтом в крупнозернистой загрузке с  $H = 0,5$  м не позволили достичь условий для завершения процесса хлопьеобразования, поэтому эффект последующего осветления оказался хуже по сравнению с эффектом, достигнутым при механическом перемешивании.

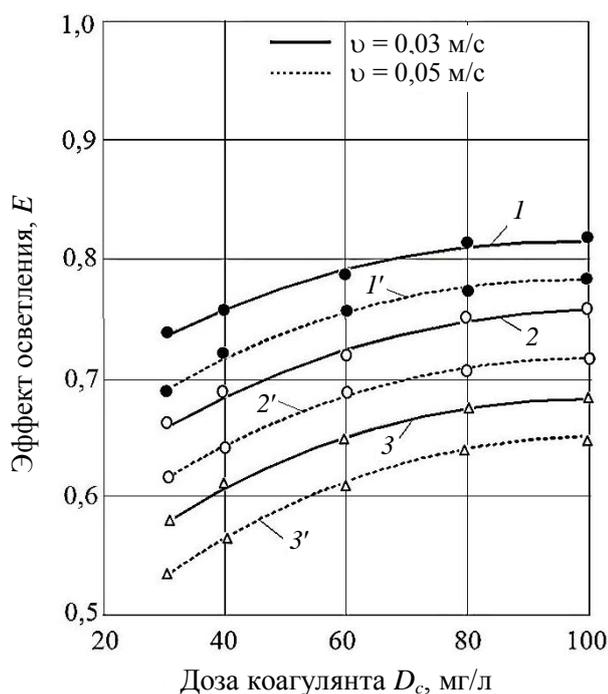


Рис. 3. График зависимости эффекта осветления воды после отстаивания от доз коагулянта при значениях скорости фильтрования  $v$  0,03 и 0,05 м/с в контактной камере с высотой фильтрующего слоя  $H = 0,5$  м с различной крупностью загрузки: 1 и 1' – при  $d = 10$  мм; 2 и 2' – при  $d = 30$  мм; 3 и 3' – при  $d = 50$  мм

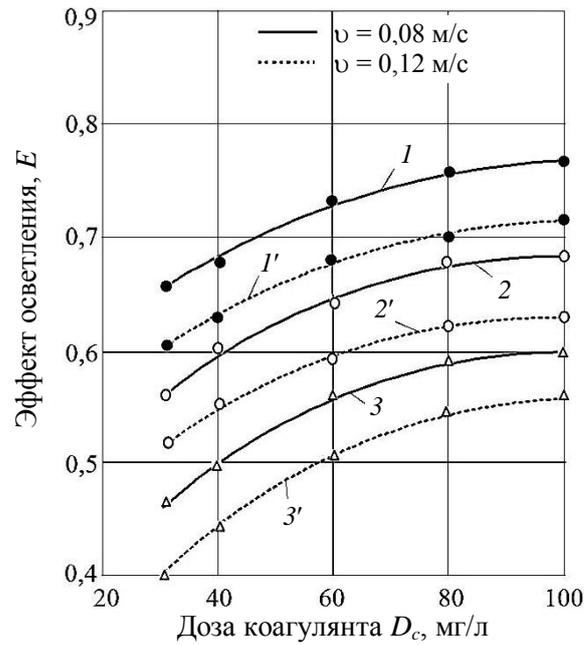


Рис. 4. График зависимости эффекта осветления воды после отстаивания от доз коагулянта при значениях скорости фильтрации  $v = 0,08$  и  $0,12$  м/с в контактной камере с высотой фильтрующего слоя  $H = 0,5$  м с различной крупностью загрузки: 1 и 1' — при  $d = 10$  мм; 2 и 2' — при  $d = 30$  мм; 3 и 3' — при  $d = 50$  мм

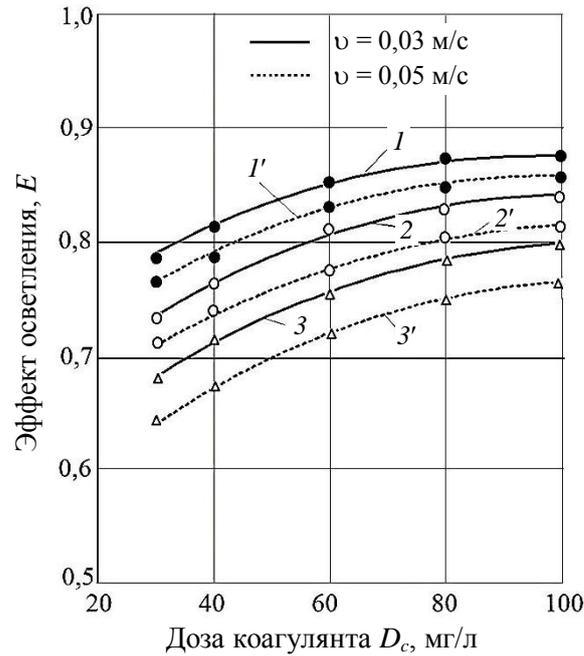


Рис. 5. График зависимости эффекта осветления воды после отстаивания от доз коагулянта при значениях скорости фильтрации  $v = 0,03$  и  $0,05$  м/с в контактной камере с высотой фильтрующего слоя  $H = 1,0$  м с различной крупностью загрузки: 1 и 1' — при  $d = 10$  мм; 2 и 2' — при  $d = 30$  мм; 3 и 3' — при  $d = 50$  мм

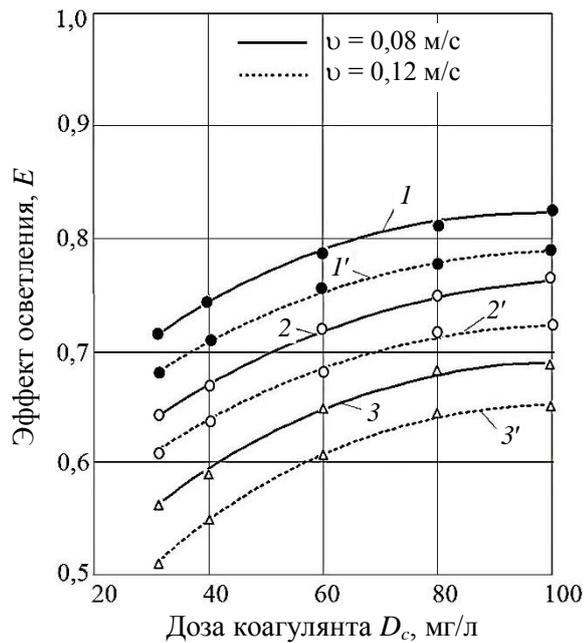


Рис. 6. График зависимости эффекта осветления воды после отстаивания от доз коагулянта при значениях скорости фильтрации  $v = 0,08$  и  $0,12$  м/с в контактной камере с высотой фильтрующего слоя  $H = 1,0$  м с различной крупностью загрузки: 1 и 1' — при  $d = 10$  мм; 2 и 2' — при  $d = 30$  мм; 3 и 3' — при  $d = 50$  мм

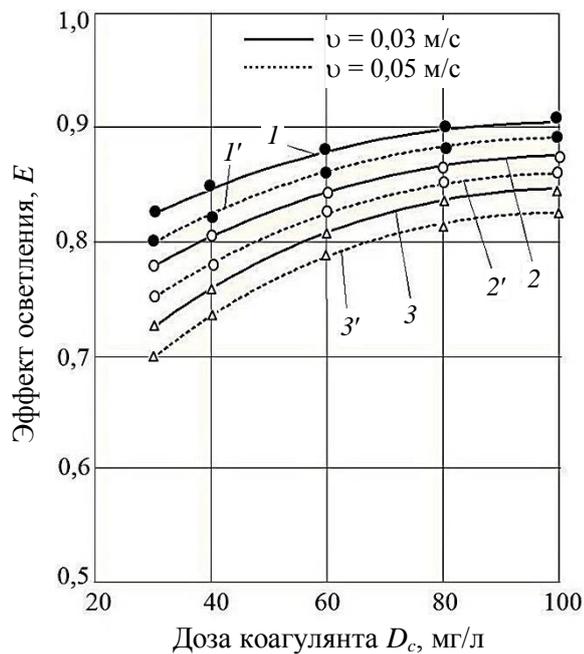


Рис. 7. График зависимости эффекта осветления воды после отстаивания от доз коагулянта при значениях скорости фильтрации  $v = 0,03$  и  $0,05$  м/с в контактной камере с высотой фильтрующего слоя  $H = 2,0$  м с различной крупностью загрузки: 1 и 1' — при  $d = 10$  мм; 2 и 2' — при  $d = 30$  мм; 3 и 3' — при  $d = 50$  мм

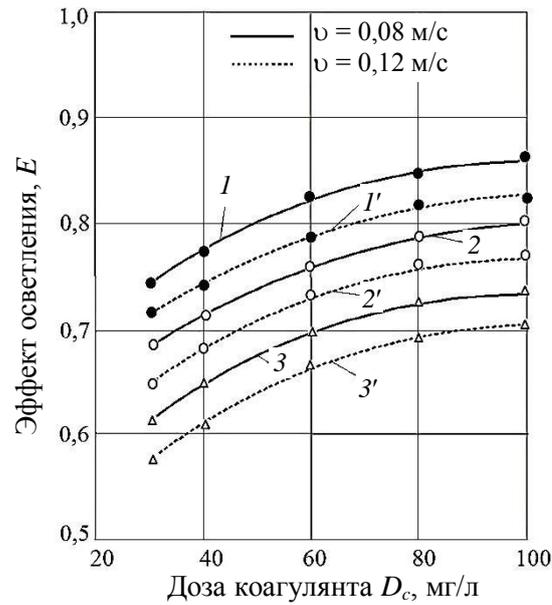


Рис. 8. График зависимости эффекта осветления воды после отстаивания от доз коагулянта при значениях скорости фильтрации  $v$  0,08 и 0,12 м/с в контактной камере с высотой фильтрующего слоя  $H = 2,0$  м с различной крупностью загрузки: 1 и 1' – при  $d = 10$  мм; 2 и 2' – при  $d = 30$  мм; 3 и 3' – при  $d = 50$  мм

Графики изменения эффекта осветления для крупнозернистой загрузки с  $H = 1,0$  м показаны на рис. 5 и 6.

Увеличение времени контакта воды с коагулянтom и критерия Кэмпa соответственно до 12 с и до  $G_{c\tau}$  до  $1,95 \cdot 10^3$ – $3,97 \cdot 10^3$  в толще крупнозернистой загрузки с удельной поверхностью  $\omega = 387$ – $390$  м<sup>-1</sup> позволило существенно улучшить условия для осуществления процесса коагуляции частиц твёрдой фазы и достичь последующего эффекта осветления отстаиванием  $E = 0,86$ – $0,88$ , сопоставимого с эффектом, полученным при оптимальных режимах перемешивания в свободном объёме с помощью механической мешалки.

На рис. 7 и 8 представлены графики зависимости  $E = f(D_c)$  для крупнозернистой загрузки высотой  $H = 2,0$  м. Время контакта воды с коагулянтom при данной толщине слоя варьировалось от 5,6 до 24,6 с (см. табл. 2).

Максимальный эффект осветления воды отстаиванием ( $E = 0,89$ – $0,905$ ) был получен при предварительном её перемешивании с коагулянтom в загрузке  $d = 10$  мм при скоростях фильтрации 0,03 и 0,05 м/с (рис. 7, кривые 1, 1'). Следует отметить весьма высокий эффект осветления ( $E = 0,85$ – $0,86$ ) при использовании загрузки  $d = 30$  мм ( $\omega = 129$ – $130$  м<sup>-1</sup>) с  $G = 87$  с<sup>-1</sup> и  $G = 176$  с<sup>-1</sup> (рис. 7, кривые 2 и 2'). Значения критерия Кэмпa  $G\tau$  для указанных диапазонов загрузок находились в пределах  $3,8 \cdot 10^3$ – $4,7 \cdot 10^3$ .

### Выводы

1. Экспериментальные исследования показали, что в качестве контактной загрузки при коагуляции примесей может быть использован крупнозернистый фильтрующий материал, обладающий относительно небольшим гид-

равлическим сопротивлением, работающий в условиях турбулентного фильтрования и предельной насыщенности осадком его порового пространства.

2. При перемешивании воды с концентрацией примесей  $C_0 = (1,1-1,15)10^{-4}$  и раствором коагулянта СА в слое крупнозернистой загрузки с удельной поверхностью пор  $\omega > 130 \text{ м}^{-1}$  для достижения максимального эффекта осветления воды при её последующем отстаивании требуемые значения критерия Кэмпара в 1,5–3,9 раза ниже по сравнению со способом механического перемешивания в свободном объеме. Уменьшение затрат энергии на перемешивание в крупнозернистом слое происходит за счёт сокращения необходимого времени контакта воды с раствором коагулянта.

3. Для достижения эффекта осветления отстаиванием требуемые дозы коагулянта при перемешивании с водой в слое контактной загрузки могут быть сокращены в 1,2–2,0 раза по сравнению со способом механического перемешивания.

4. Наибольший эффект осветления с использованием крупнозернистой загрузки достигается при следующих параметрах перемешивания загрязненной воды с раствором коагулянта СА: удельная поверхность зерен загрузки  $\omega = 130-390 \text{ м}^{-1}$ , критерии Кэмпара  $G_{\text{с}}\tau = (0,23-0,78)10^4$ , время контакта в слое  $\tau = 12-14 \text{ с}$ . При увеличении удельной поверхности загрузки с 76,2 до 390  $\text{ м}^{-1}$  и времени контакта воды с коагулянтам эффективность последующего осветления воды отстаиванием повышается.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бабенков Е.Д.* Очистка воды коагулянтами. М.: Недра, 1977. 356 с.
2. *Драгинский В.Л., Алексеева Л.П., Гетманцев С.В.* Коагуляция в технологии очистки природных и сточных вод. М.: Науч. изд., 2005. 576 с.
3. *Фрог Б.Н., Левченко А.П.* Водоподготовка. М.: Изд-во МГУ, 1996. 680 с.
4. *Camp T.R., Stein P.C.* Velocity gradient and integral work in fluid motion // *Journ. Boston Society of Civil Eng.* 1943. 30, 4. P. 219–237.
5. *Camp T.R.* Flocculation and flocculation basins // *Journ. Amer. Soc. Civil Eng.* 1955. 120. P. 1–16.
6. *Camp T.R.* Flocc volume concentration // *Journ. Amer. Water Works Assoc.* 1968. 6, 60. P. 656–673.
7. *Yatuna S.V., Graham A.G.* Application of low-mixing energy for the coagulation process // *Water Res.* 2015. 84. P. 333–341.
8. *Yu W.Z., Gregory J., Campos, L., Li G.B.* The role of mixing conditions on floc growth, breakage and re-growth // *Chem. Eng. Journ.* 2011. 171. P. 425–430.
9. *Гришин Б.М., Андреев С.Ю., Салмин С.М.* Закономерности изменения гидравлического сопротивления крупнозернистой контактной загрузки при фильтровании водной суспензии // *Региональная архитектура и строительство.* 2013. № 3. С. 121–127.
10. *Грабовский А.П., Прогульный В.И.* Математическая модель коагуляции и регенерации крупнозернистых слоев малой толщины // *Химия и технология воды.* 1990. № 6. Т. 12. С. 494–497.
11. *Миц Д.М.* Теоретические основы технологии очистки воды. М.: Стройиздат, 1964. 156 с.
12. *Салмин С.М.* Коагуляция примесей природных вод с использованием крупнозернистой контактной загрузки: дис. ... канд. техн. наук. Пенза: ПГУАС, 2015. 149 с.

#### REFERENCES

1. *Babenkov E.D.* Ochistka vody koagulyantami [Water purification with coagulants]. Moscow: Nedra, 1977. 356 p. (rus)

2. Draginskii V.L. Alekseeva L.P., Getmantsev S.V. Koagulyatsiya v tekhnologii ochestki prirodnykh i stochnykh vod [Coagulation in natural and wastewater treatment technology]. Moscow: Nauch. izd., 2005. 576 p. (rus)
3. Frog B.N., Levchenko A.P. Vodopodgotovka [Water treatment]. Moscow: MGU, 1996. 680 p. (rus)
4. Camp T.R., Stein P.C. Velocity gradient and integral work in fluid motion. *Journal of the Boston Society of Civil Engineering*. 1943. V.30. No. 4. Pp. 219–237.
5. Camp T.R. Flocculation and flocculation basins. *American Society of Civil Engineers*. 1955. 120. Pp. 1–16.
6. Camp T.R. Flocc volume concentration. *Journal of the American Water Works Association*. 1968. V. 60. No. 6. Pp. 656–673.
7. Yamuna S.V., Graham, A.G. Application of low-mixing energy for the coagulation process. *Water Research*. 2015. V. 84. Pp. 333–341.
8. Yu W.Z., Gregory J., Campos L., Li G.B. The role of mixing conditions on floc growth, breakage and re-growth. *Chemical Engineering Journal*. 2011. V. 171. Pp. 425–430.
9. Grishin B.M., Andreev S.Yu., Salmin S.M. Zakonomernosti izmeneniya gidravlicheskogo soprotivleniya krupnozernistoi kontaktnoi zagruzki pri fil'trovanii vodnoi suspenzii [Change in hydraulic resistance of coarse-grained contact load when filtering aqueous suspension]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo*. 2013. No. 3. Pp. 121–127. (rus)
10. Grabovskii A.P., Progul'nyi V.I. Matematicheskaya model' kol'matatsii i regeneratsii krupnozernistykh sloev maloi tolshchiny [Mathematical model of colmatation and regeneration of coarse-grained layers of small thickness]. *Khimiya i tekhnologiya vody*. 1990. No. 6. V. 12. Pp. 494–497. (rus)
11. Mints D.M. Teoreticheskie osnovy tekhnologii ochestki vody [Theoretical basis of water purification technology]. Moscow: Stroiizdat, 1964. 156 p. (rus)
12. Salmin S.M. Koagulyatsiya primesei prirodnykh vod s ispol'zovaniem krupnozernistoi kontaktnoi zagruzki: dis. ... kand. tekhn. nauk [Coagulation of impurities of natural waters using coarse contact loading. PhD Thesis]. Penza: PGUAS, 2015. 149 p. (rus)

#### Сведения об авторах

Максимова Светлана Валентиновна, канд. техн. наук, доцент, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

Салмин Сергей Михайлович, канд. техн. наук, ст. преподаватель, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28.

Осипова Елена Юрьевна, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kaf\_wiw@tsuab.ru

Бокиев Бокиджон Рахимович, канд. техн. наук, Таджикский технический университет им. академика М.С. Осими, 734042, г. Душанбе, ул. ак. Раджабовых, 10.

#### Authors Details

Setlana V. Maksimova, PhD, A/Professor, Tyumen State Oil and Gas University, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia.

Sergei M. Salmin, PhD, Senior Lecturer, Penza State University of Architecture and Construction, 28, German Titov Str., 440028, Penza, Russia.

Elena.Yu. Osipova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kaf\_wiw@tsuab.ru

Bokidzhon R. Bokiev, PhD, Technological University of Tajikistan, 10, Akademiki Radzhabovykh Str., 734042, Dushanbe, Tajikistan