

В. И. КИЧИГИН
А. А. ЮДИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОСАДКА ОТ ЕГО ВЛАЖНОСТИ И ИСХОДНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ БЕНТОНИТОВОГО ЗАМУТНИТЕЛЯ

INVESTIGATION OF THE DEPENDENCE OF SEDIMENT SPECIFIC RESISTANCE
ON ITS HUMIDITY AND INITIAL CONCENTRATION BENTONITE HADDENER

Установлено, что интенсивность роста значения рН в растворах дистиллята оказалась несколько выше, чем в растворах с водой городской водопроводной станции (ГВС). Показано, что в растворах с дистиллированной водой величина окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) уменьшалась интенсивнее, чем в фильтрах тех же растворов. Абсолютные значения ОВП были несколько больше в растворе бентонитовой глины с дистиллятом, чем в растворе с водой ГВС. Доказано, что скорость водоотдачи осадка увеличивалась с ростом начальной влажности осадка W_n и концентрации замутнителя C_n в исследуемом растворе, причем темп водоотдачи был выше в пробах, где использовалась вода с ГВС в качестве растворителя. Получены математические модели зависимости удельного сопротивления осадка от его исходной влажности, начальной концентрации замутнителя и солевого состава растворителя.

Ключевые слова: удельное сопротивление осадка, водоотдача, вид растворителя, изменение рН и ОВП

Необработанные и неутилизированные осадки, заполонившие огромные земельные пространства, являются насущной проблемой настоящего времени [1, 2]. Отмечается [3, с. 3], что «...количественное накопление промوتходов на одного человека в год в 18-20 раз превышает нормы накопления бытовых отходов». В настоящее время существует два направления борьбы за окружающую среду. Первый заключается в создании малоотходных и безотходных технологий основных производств, утилизации образующихся отходов и ужесточении нормативов на их выбросы в окружающую среду. Второй – в разработке более мягких нормативов на выброс. К сожалению, (особенно в 90-х гг. XX в. и в нулевых XXI в.), многие ведомства отдавали предпочтение второму направлению, ведущему к экологической катастрофе. Между тем еще в 80–90-х гг. прошлого века на кафедре строительных материалов Самарского государствен-

It was found that the intensity of the growth of the pH value in distillate solutions turned out to be somewhat higher than in solutions with water from the city waterworks (DHW). The absolute values of ORP were somewhat higher in a solution of bentonite clay with distillate than in a solution with DHW water. It has been proven that the rate of water loss of sediment r increased with an increase in the initial moisture content of the sediment W_n and the concentration of the turbidity C_n in the test solution, and the rate of water loss was higher in samples where water with hot water was used as a solvent. Mathematical models of the dependence of the sediment resistivity on its initial moisture content, the initial concentration of the opacifying agent, and the salt composition of the solvent are obtained.

Keywords: sediment resistivity, moisture loss, type of solvent, change in pH and ORP

ного архитектурно-строительного университета были не только разработаны, но и внедрены в производство технологии получения различных строительных материалов из промышленных отходов [3] и осадков промстоков [4, 5].

Обработка и утилизация выделенных из воды осадков – весьма сложный технологический процесс. На пути решения этой проблемы задача обезвоживания осадка относится к категории наиболее трудной. Коэффициент удельного сопротивления осадка r – это основной показатель его водоотдачи. Он позволяет определить необходимую степень обработки осадков перед их обезвоживанием, а также выбрать метод обработки осадков и подобрать необходимые для этого сооружения.

Целью данной работы являлась разработка технологии определения величины и метода анализа результатов удельного сопротивления осадка.

Методика проведения исследований. Исследования проводились на установке, представленной на рис. 1. Учитывая, что величина коэффициента удельного сопротивления осадка r зависит от большого числа исходных параметров (прежде всего физико-химических показателей качества растворителя осадка и самого осадка, его влажности, наличия реагентов и т. п.), было принято решение о проведении начальных исследований на модельном растворе. Опыты ставили на искусственно приготовленной жидкости, состоящей из дистиллированной воды или воды с городской водопроводной станции (ГВС) г. Самары (табл. 1), в которую (в качестве замутнителя) вводилось определенное количество природного глинистого гидроалюмосиликатного минерала (бентонита), разбухающего при гидратации в 14-16 раз. Это сложный по структуре минерал, состав которого определяется содержанием в глине монтмориллонита, имеющего формулу $\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, где кремний может замещаться различными катионами (Al^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Zn^{2+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ и др.). В нашем случае использовалась кальциевая бентонитовая глина.

В качестве имитации осадка с очистных сооружений использовалась бентонитовая глина с концентрациями: 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 г/дм³. Было проведено по четыре серии опытов на растворах с водопроводной и с дистиллированной водой. Величины рН и окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) определялись на рН-метре Orville ML-51.

Приготовленный раствор бентонитовой глины профильтровывался через двойной бумажный фильтр с синей лентой под давлением 500 мм рт. ст. Параметры водоотдачи исследуемого осадка записывались каждые 30 с в течение

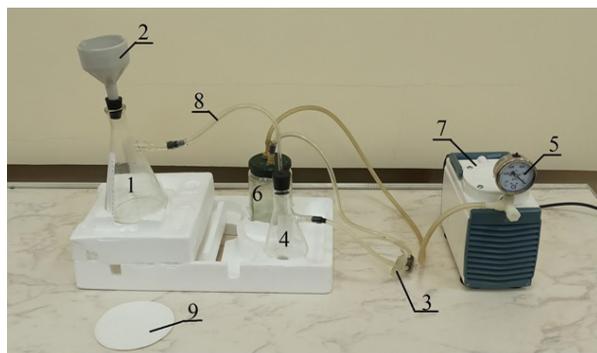


Рис. 1. Лабораторный стенд для определения удельного сопротивления осадка: 1 – колба Бунзена; 2 – воронка Бюхнера; 3 – запорный кран; 4 – колба Бунзена (ёмкость для сбора фильтрата); 5 – вакуумметр; 6 – ресивер; 7 – вакуумный насос; 8 – вакуумный шланг; 9 – бумажный фильтр

15 мин. Значения рН и ОВП измерялись в чистой воде, растворе и фильтрате.

Таблица 1

Качественный состав воды с ГВС [4]

| Показатель | Норматив | ГВС (РЧВ №1) |
|------------------------------|----------|--------------|
| Цветность, град | 20 | 10,6 |
| Мутность, мг/дм ³ | 1,5 | < 0,58 |
| Температура, °С | - | 24,0 |
| рН | 6-9 | 7,8 |
| Жесткость, град | 7 | 3,3 |

Порядок проведения опытов рандомизировался с помощью генератора случайных чисел. Полученные результаты обрабатывались методами математической статистики при уровне значимости $q = 0,05$ по методике, изложенной в работе [5, с. 136]. Доверительную оценку искомых величин определяли по формуле

$$|X - \bar{x}| < t(q; k) \cdot S_x / (n - 1)^{1/2}, \quad (1)$$

где X – доверительная граница для истинного значения искомой (измеренной) величины; \bar{x} – среднее арифметическое значение измеряемой величины, рассчитанное по n измеренным величинам; t – критическая точка распределения Стьюдента, определяемая по [5, прил. 5.5] при принятом в расчетах уровне значимости $q = 0,05$ и числе степеней свободы; k , S_x – эмпирический стандарт, определяемый при числе степеней свободы $k = n - 1$.

Расчетная величина удельного сопротивления осадка определялась по методике, изложенной в работе [6, с. 15–19] и по формуле

$$r = 2 \cdot P \cdot F^2 \cdot b / C \cdot \eta, \text{ см/г}, \quad (2)$$

где P – вакуум, при котором происходит фильтрование; F – площадь фильтрующей поверхности воронки Бюхнера; η – динамический коэффициент вязкости фильтрата; C – концентрация твердой фазы осадка; b – параметр, получаемый опытным путем; τ – продолжительность фильтрования; V – объем выделяемого фильтрата.

В системе СИ размерность r – в м/кг. При измерении в с/см^6 , а концентрации осадка C в г/см^3 величина r измеряется в см/г . Концентрация твердой фазы осадка определялась по формуле

$$C = (100 - W_{\text{н}}) \cdot \rho / 100, \quad (3)$$

где $W_{\text{н}}$ – влажность исходного осадка, %; ρ – плотность осадка, кг/м^3 .

В нашем случае значение параметра находилось как среднее вероятное значение из 5–10 величин опытных данных τ / V^2 . Удельное сопротивление осадка определялось при постоянных значениях F , η и P . В наших опытах: $F = \pi d^2 / 4 = 78,5 \text{ см}^2$; $\eta = 0,001 \text{ Па}\cdot\text{с}$; $P = 500 \text{ мм рт. ст.} = 66,65 \text{ кПа} = 0,68 \text{ кгс/см}^2$.

Если обозначить в формуле (2) $(2 \cdot P \cdot F^2 / \eta) = k$, получим:

$$r = k \cdot b / C, \text{ см/г.} \quad (4)$$

Для наших опытов значение будет равно:

$$k = (2 \cdot 66,65 \cdot 10^3 \cdot 61,62 \cdot 10^2) / (1 \cdot 10^{-3}) \approx 82,1 \cdot 10^{10} \text{ см}^4/\text{с}.$$

Все дальнейшие расчеты были проведены при значениях: $\rho = 1,0 \text{ г/см}^3$ и влажности осадка $W_{\text{н}}$ %: 97,0; 98,0; 99,0.

Полученные результаты лабораторных исследований приведены в табл. 2, 4–6, а их графическое изображение представлено на рис. 2–8.

Обсуждение полученных результатов. Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что осредненные значения рН *растворителя* в виде дистиллированной воды изменялись от 5,42 до 5,99, а в виде воды ГВС – от 6,92 до 7,07. С ростом концентрации замутнителя $C_{\text{н}}$ осредненные величины рН *раствора бентонита* в дистиллированной воде изменялись от 7,42 до 8,25, а в воде ГВС – от 7,06 до 7,22. Осредненные значения рН фильтрата изменялись от 6,33 до 7,70 в дистилляте и от 7,24 до 7,43 в воде ГВС.

Графическое представление зависимостей $\text{рН} = f(C_{\text{н}})$ указывает (коэффициентами парной корреляции R^2) на *очень сильную* связь по шкале Чеккода (табл. 3) между значениями рН и $C_{\text{н}}$ в *растворе и фильтрате*, где в качестве растворителя

Таблица 2

Опытные значения величин рН и ОВП

| Концентрация замутнителя, г/дм ³ | Значения показателей при $q = 0,05$ | | | | | |
|--|-------------------------------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| | в растворителе без замутнителя | | в растворе | | в фильтрате | |
| | рН | ОВП, мВ | рН | ОВП, мВ | рН | ОВП, мВ |
| Растворитель замутнителя – дистиллированная вода | | | | | | |
| 0,05 | 5,77±0,92 | 172,5±43,2 | 6,28±1,58 | 150,5±29,3 | 6,33±1,23 | 147,8±21,0 |
| 0,1 | 5,95±1,21 | 170,7±73,8 | 6,44±1,63 | 160,3±30,1 | 6,52±1,42 | 153,0±16,1 |
| 0,2 | 5,88±0,91 | 185,8±65,0 | 6,42±1,24 | 153,0±44,0 | 6,59±1,41 | 169,2±65,6 |
| 0,3 | 5,88±0,94 | 170,7±107,9 | 6,86±1,30 | 135,3±83,0 | 6,81±1,26 | 157,7±137,2 |
| 0,4 | 5,78±0,79 | 190,0±131,2 | 6,90±1,19 | 147,7±108,7 | 6,79±1,40 | 158,7±76,0 |
| 0,5 | 5,77±0,87 | 186,3±143,7 | 7,31±1,62 | 120,7±125,2 | 6,85±1,29 | 162,7±118,1 |
| 0,6 | 5,68±1,05 | 196,2±72,7 | 7,42±2,17 | 121,5±67,2 | 7,01±1,79 | 153,8±70,1 |
| 0,7 | 5,99±1,12 | 204,0±137,0 | 7,88±1,91 | 113,0±100,8 | 7,25±1,22 | 147,7±57,4 |
| 0,8 | 5,78±0,95 | 182,3±60,6 | 8,25±1,35 | 94,0±58,2 | 7,17±1,05 | 158,0±95,5 |
| 0,9 | 5,42±0,76 | 190,7±189,6 | 8,22±2,04 | 80,0±92,8 | 7,70±1,07 | 113,0±116,5 |
| Растворитель замутнителя – питьевая вода с ГВС | | | | | | |
| 0,05 | 7,07±1,03 | 156,2±69,4 | 7,13±0,95 | 155,2±54,3 | 7,34±0,99 | 140,6±91,9 |
| 0,1 | 7,06±1,06 | 141,2±72,0 | 7,06±1,11 | 142,2±65,7 | 7,24±1,15 | 133,8±75,2 |
| 0,2 | 7,06±1,09 | 153,8±95,8 | 7,12±1,19 | 145,2±96,4 | 7,42±1,07 | 144,2±81,0 |
| 0,3 | 6,98±1,09 | 141,5±79,3 | 7,11±1,11 | 140,5±77,3 | 7,30±1,15 | 132,2±100,0 |
| 0,4 | 7,02±1,13 | 155,2±125,0 | 7,15±1,13 | 150,8±71,9 | 7,32±1,19 | 136,5±83,2 |
| 0,5 | 7,07±1,13 | 155,2±125,0 | 7,13±1,21 | 143,2±95,8 | 7,43±1,01 | 134,2±103,5 |
| 0,6 | 7,02±0,97 | 146,6±91,3 | 7,09±1,20 | 140,0±126,2 | 7,36±1,15 | 128,7±148,5 |
| 0,7 | 7,02±1,06 | 141,8±84,2 | 7,10±1,26 | 138,2±83,8 | 7,36±1,16 | 126,9±92,5 |
| 0,8 | 7,04±1,03 | 144,2±59,6 | 7,15±1,08 | 137,2±62,2 | 7,43±1,00 | 123,8±88,6 |
| 0,9 | 7,03±1,06 | 155,8±79,3 | 7,22±1,12 | 150,8±57,4 | 7,36±0,94 | 128,2±79,2 |

использовался дистиллят (рис. 2) и практическое отсутствие или слабую связь между этими величинами в аналогичных опытах с водой ГВС (рис. 3).

Было установлено (см. рис. 2 и 3), что в исследуемом диапазоне изменения параметров значения рН находились в прямо пропорциональной зависимости от увеличения концентрации замутнителя C_n . Причем интенсивность роста значения рН (J_{pH}) на единицу увеличения концентрации замутнителя C_n составляла, ед. рН/(г/дм³):

- в растворе дистиллята $J_{pH} = \Delta pH / \Delta C_n \approx (8,25 - 6,5) / (0,9 - 0,1) \approx 2,19$;
- в растворе воды с ГВС –

- в фильтрате раствора с дистиллятом – $J_{pH} = (7,5 - 6,4) / 0,8 \approx 1,38$;

- в фильтрате раствора с водой ГВС –

- в фильтрате раствора с водой ГВС – $J_{pH} = (7,4 - 7,32) / 0,8 \approx 0,10$.

Таким образом, интенсивность роста значения рН в растворах дистиллята оказалась несколько выше, чем в растворах с водой ГВС.

Характер изменения зависимости $ОВП = f(C_n)$ существенно отличался от зависимости $pH = f(C_n)$. Например, при использовании в качестве растворителя исследуемой жидкости дистиллированной воды величина ОВП уменьшалась в растворе интенсивнее, чем в фильтрате (рис. 4). Причем, если в растворе бентонита коэффициент парной корреляции $R^2 \approx 0,90$ имел очень сильную (практически функциональную) силу связи, то в фильтрате этого же раствора зависимость между величинами $ОВП = f(C_n)$ практически отсутствовала ($R^2 \approx 0,24$).

Если в качестве растворителя бентонитовой глины использовали воду ГВС (рис. 5), то ОВП раствора имел величину $R^2 \approx 0,11$, т. е. по шкале Чеддока (табл. 3), связь между величинами

Таблица 3

Шкала Чеддока [7, табл. 19]

| Коэффициент парной корреляции R^2 | До 0,3 | 0,3-0,5 | 0,5-0,7 | 0,7-0,9 | 0,9-0,99 |
|-------------------------------------|-------------------------|---------|----------|---------|---------------|
| Характеристика силы связи | Практически отсутствует | Слабая | Заметная | Сильная | Очень сильная |

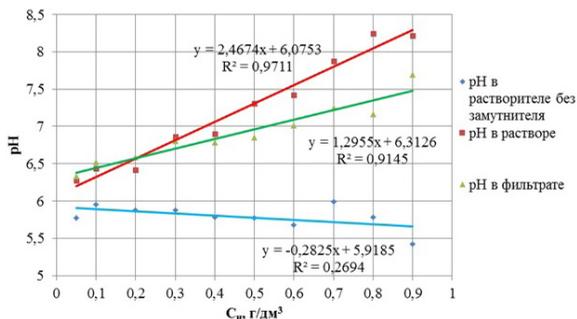


Рис. 2. Осредненная зависимость изменения величины рН от C_n в сериях опытов с дистиллированной водой

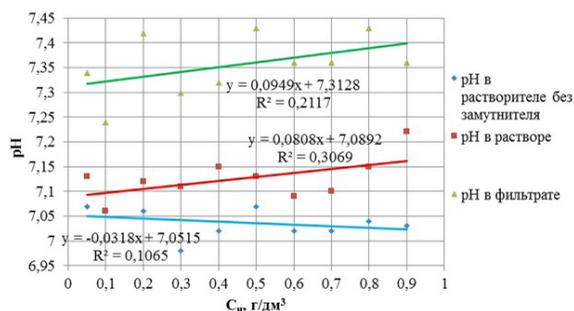


Рис. 3. Осредненная зависимость изменения величины рН от C_n в сериях опытов с водой из ГВС

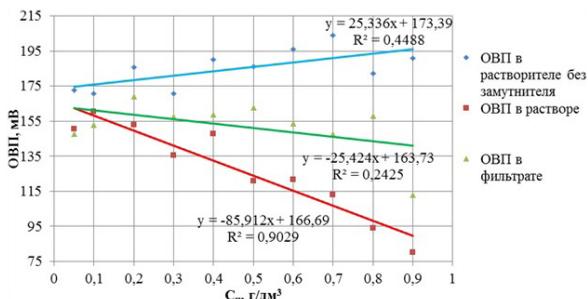


Рис. 4. Осредненная зависимость изменения величины ОВП от C_n в серии опытов с дистиллированной водой

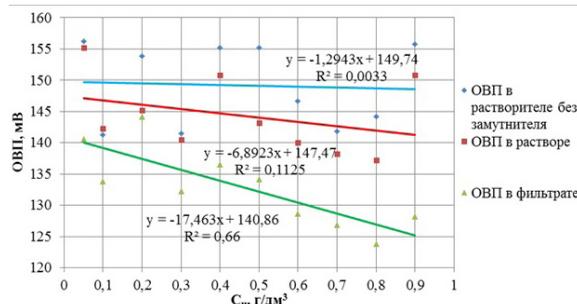


Рис. 5. Осредненная зависимость изменения величины ОВП от C_n в серии опытов с водой из ГВС

ОВП = $f(C_n)$ практически отсутствовала, а в фильтрате этого же раствора становилась уже заметной ($R^2 \approx 0,66$). Абсолютное значение ОВП было несколько больше в растворе бентонитовой глины с дистиллятом, чем в растворе с водой ГВС.

Из анализа данных, приведенных на рис. 4 и 5, было установлено, что в исследуемом диапазоне изменения параметров значения ОВП находились в обратно пропорциональной зависимости от увеличения концентрации замутнителя C_n . Причем интенсивность снижения значения ОВП ($J_{ОВП}$) на единицу увеличения концентрации замутнителя C_n составляла, мВ/(г/дм³):

- в растворе дистиллята – $J_{ОВП} = \Delta ОВП / \Delta C_n \approx (90 - 158) / (0,9 - 0,1) \approx - 85,0$;
- в растворе воды с ГВС – $J_{ОВП} = (141 - 147) / 0,8 \approx - 7,5$;
- в фильтрате раствора с дистиллятом – $J_{ОВП} = (140 - 160) / 0,8 \approx - 25,0$;
- в фильтрате раствора с водой ГВС – $J_{ОВП} = (125 - 139) / 0,8 \approx - 17,5$.

Таким образом, интенсивность снижения ОВП в растворах дистиллята оказалась выше, чем в растворах с водой ГВС.

В табл. 4 и 5 представлены опытно-расчетные данные параметра $b \cdot 10^{-2}$, с/см⁶, в формуле (4), по которым были сначала рассчитаны значения удельного сопротивления осадка $r \cdot 10^{10}$, см/г, по всем четырем сериям опытов с растворителем в виде дистиллята и воды ГВС (в статье не показано). Осредненные значения удельного сопротивления исследуемых осадков $r \cdot 10^{10}$, см/г, в зависимости от концентрации замутнителя C_n , г/дм³, и начальной влажности осадка W_n , %, приведены в табл. 7. Осредненные при уровне значимости $q = 0,05$ значения из табл. 4 и 5 представлены в табл. 6 и на рис. 6.

Анализ данных, приведенных в табл. 4–6 и на рис. 6, показал, что значения параметра b в формуле (4) росли прямо пропорционально увеличению начальной концентрации бенто-

Таблица 4

Опытно-расчётные данные параметра $b \cdot 10^{-2}$, с/см⁶, исследуемого осадка в формуле (4) для раствора с использованием дистиллированной воды

| Концентрация замутнителя C_n , г/дм ³ | Параметр b , с/см ⁶ | Концентрация замутнителя C_n , г/дм ³ | Параметр b , с/см ⁶ |
|--|----------------------------------|--|----------------------------------|
| Первый опыт | | Второй опыт | |
| 0,05 | 0,0066 | 0,05 | 0,006 |
| 0,1 | 0,0032 | 0,1 | 0,0022 |
| 0,2 | 0,0146 | 0,2 | 0,0024 |
| 0,3 | 0,0064 | 0,3 | 0,0109 |
| 0,4 | 0,0301 | 0,4 | 0,019 |
| 0,5 | 0,0476 | 0,5 | 0,0256 |
| 0,6 | 0,0392 | 0,6 | 0,0427 |
| 0,7 | 0,0978 | 0,7 | 0,0195 |
| 0,8 | 0,0174 | 0,8 | 0,0933 |
| 0,9 | 0,0175 | 0,9 | 0,0233 |
| Третий опыт | | Четвертый опыт | |
| 0,05 | 0,0012 | 0,05 | 0,002 |
| 0,1 | 0,0066 | 0,1 | 0,0104 |
| 0,2 | 0,0054 | 0,2 | 0,0141 |
| 0,3 | 0,0203 | 0,3 | 0,0174 |
| 0,4 | 0,0294 | 0,4 | 0,0281 |
| 0,5 | 0,0391 | 0,5 | 0,0209 |
| 0,6 | 0,053 | 0,6 | 0,0492 |
| 0,7 | 0,0472 | 0,7 | 0,0743 |
| 0,8 | 0,1503 | 0,8 | 0,0885 |
| 0,9 | 0,0522 | 0,9 | 0,1225 |

нитовой глины в растворе C_H . Причем прирост параметра b был существенно выше в растворе с использованием в качестве растворителя дистиллированной воды (см. рис. 6). Процесс

$b = f(C_H)$ хорошо аппроксимировался приведенными на рис. 6 уравнениями регрессии и характеризовался *сильной связью* между параметрами b и C_H по шкале Чеддока (см. табл. 3).

Таблица 5

Опытно-расчётные данные параметра $b \cdot 10^{-2}$, с/см⁶, исследуемого осадка в формуле (4) для раствора с использованием воды с ГВС

| Концентрация замутнителя C_H , г/дм ³ | Параметр b , с/см ⁶ | Концентрация замутнителя C_H , г/дм ³ | Параметр b , с/см ⁶ |
|--|----------------------------------|--|----------------------------------|
| Первый опыт | | Второй опыт | |
| 0,05 | 0,0069 | 0,05 | 0,0031 |
| 0,1 | 0,0061 | 0,1 | 0,0051 |
| 0,2 | 0,0122 | 0,2 | 0,0105 |
| 0,3 | 0,0085 | 0,3 | 0,0087 |
| 0,4 | 0,0158 | 0,4 | 0,0052 |
| 0,5 | 0,0263 | 0,5 | 0,0073 |
| 0,6 | 0,028 | 0,6 | 0,0077 |
| 0,7 | 0,0161 | 0,7 | 0,009 |
| 0,8 | 0,0328 | 0,8 | 0,0181 |
| 0,9 | 0,0242 | 0,9 | 0,0145 |
| Третий опыт | | Четвертый опыт | |
| 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,0032 |
| 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0019 |
| 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,003 |
| 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,0088 |
| 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,0057 |
| 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,0063 |
| 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,0061 |
| 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,0073 |
| 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,0092 |
| 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,0086 |

Таблица 6

Осредненные опытнo-расчётные значения параметра $b \cdot 10^{-2}$, с/см⁶, в формуле (4) (при уровне значимости $q = 0,05$)

| Концентрация замутнителя, г/дм ³ | Значения параметра b в растворителе | | Концентрация замутнителя, г/дм ³ | Значения параметра b в растворителе | |
|---|---------------------------------------|------------------------|---|---------------------------------------|------------------------|
| | дистиллят | H ₂ O с ГВС | | дистиллят | H ₂ O с ГВС |
| 0,05 | 0,40 ± 0,50 | 0,40 ± 0,35 | 0,5 | 3,33 ± 2,26 | 1,19 ± 1,77 |
| 0,1 | 0,56 ± 0,68 | 0,42 ± 0,34 | 0,6 | 4,60 ± 1,14 | 1,29 ± 1,87 |
| 0,2 | 0,91 ± 1,13 | 0,71 ± 0,92 | 0,7 | 5,97 ± 0,623 | 1,06 ± 0,71 |
| 0,3 | 1,38 ± 1,15 | 0,92 ± 0,18 | 0,8 | 8,74 ± 10,02 | 1,76 ± 2,01 |
| 0,4 | 2,66 ± 0,95 | 0,95 ± 0,93 | 0,9 | 5,39 ± 8,87 | 1,50 ± 1,22 |

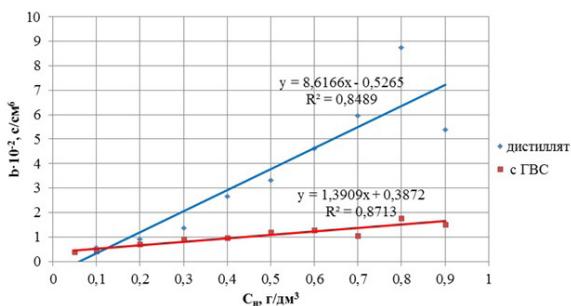


Рис. 6. Зависимости изменения осредненных значений параметра $b \cdot 10^2$ c/cm⁶, в формуле (4) от концентрации замутнителя и вида растворителя

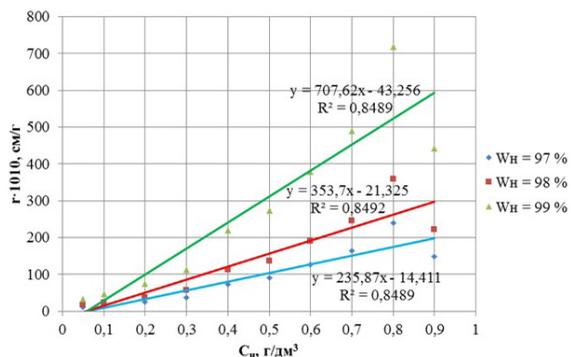


Рис. 7. Осредненная зависимость $\bar{r} = f(\bar{C}_n)$ в сериях опытов дистиллятом

Сравнительный анализ данных, представленных в табл. 7 и на рис. 7, 8, указывает на прямо пропорциональную линейную зависимость удельного сопротивления исследуемого осадка r как от концентрации замутнителя C_n , г/дм³, так и от начальной влажности осадка W_n , %, в обоих растворителях. Причем *интенсивность прироста* значения r (J) на единицу увеличения концентрации замутнителя C_n составляла, дм⁴/г²:

- растворитель – дистиллированная вода:
при $W = 97\%$: $J_{r97} = \Delta r / \Delta C_n \approx (200 - 32,5) / (0,9 - 0,1) \approx 209,4 \cdot 10^9$;
при $W = 98\%$: $J_{r98} = \Delta r / \Delta C_n \approx (300 - 16,2) / 0,8 \approx 354,8 \cdot 10^9$;

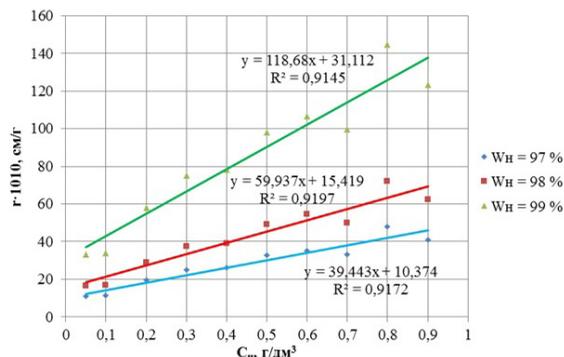


Рис. 8. Осредненная зависимость $\bar{r} = f(\bar{C}_n)$ в сериях опытов с водой из ГВС

Таблица 7

Значения удельного сопротивления исследуемых осадков $r \cdot 10^{10}$, см/г, в зависимости от концентрации замутнителя C_n , г/дм³, и начальной влажности осадка W_n , %, при уровне значимости $q = 0,05$

| Концентрация замутнителя C_n , г/дм ³ | Значения показателей $r \cdot 10^{10}$, см/г, для растворителей | | | | | |
|--|--|------------------------|--------------|------------------------|--------------|------------------------|
| | дистиллят | H ₂ O с ГВС | дистиллят | H ₂ O с ГВС | дистиллят | H ₂ O с ГВС |
| | $W_n = 97\%$ | | $W_n = 98\%$ | | $W_n = 99\%$ | |
| 0,05 | 10,8±13,8 | 11,0±9,7 | 16,2±20,7 | 16,5±14,5 | 32,5±41,7 | 33,1±29,0 |
| 0,1 | 15,4±18,7 | 11,4±9,3 | 23,0±28,1 | 17,0±13,9 | 46,0±56,1 | 34,1±27,9 |
| 0,2 | 25,0±31,0 | 19,4±25,1 | 37,5±46,5 | 29,0±37,7 | 75,0±91,1 | 58,1±75,4 |
| 0,3 | 37,6±31,7 | 25,0±4,9 | 56,5±47,5 | 37,5±7,4 | 112,9±94,9 | 75,2±14,8 |
| 0,4 | 73,0±26,0 | 26,1±25,4 | 111,9±20,0 | 39,1±38,1 | 218,9±78,0 | 78,2±76,2 |
| 0,5 | 91,2±61,8 | 32,6±48,3 | 136,8±92,7 | 49,0±72,6 | 273,6±185,3 | 98,0±145,1 |
| 0,6 | 126,0±31,4 | 35,2±50,6 | 189,0±47,1 | 54,4±75,4 | 378,0±92,2 | 106,5±153,7 |
| 0,7 | 163,4±170,5 | 33,3±23,6 | 245,0±255,3 | 49,9±35,2 | 490,0±511,6 | 99,8±70,6 |
| 0,8 | 239,2±274,3 | 48,1±55,0 | 358,9±414,4 | 72,1±82,5 | 717,7±822,9 | 144,9±163,8 |
| 0,9 | 147,5±242,8 | 41,1±33,4 | 221,3±364,2 | 62,4±48,2 | 442,5±728,5 | 123,2±100,0 |

при $W = 99\%$: $J_{,99} = \Delta r / \Delta C_{\text{н}} \approx (600 - 13,8) / 0,8 \approx 732,8 \cdot 10^9$;

• растворитель – вода ГВС:

при $W = 97\%$: $J_{,97} = \Delta r / \Delta C_{\text{н}} \approx (45 - 11) / 0,8 \approx 42,5 \cdot 10^9$;

при $W = 98\%$: $J_{,98} = \Delta r / \Delta C_{\text{н}} \approx (68 - 16,5) / 0,8 \approx 64,0 \cdot 10^9$;

при $W = 99\%$: $J_{,99} = \Delta r / \Delta C_{\text{н}} \approx (140 - 33,1) / 0,8 \approx 133,6 \cdot 10^9$.

Было установлено, что интенсивность прироста удельного сопротивления осадка увеличивалась с ростом начальной влажности осадка как при использовании в качестве растворителя дистиллята (см. рис. 7), так и воды ГВС (см. рис. 8). Причем бльшие абсолютные значения величины наблюдались в растворах с дистиллированной водой.

Полученные коэффициенты парной корреляции R^2 указывают на *сильную* (для растворителя из дистиллята – см. рис. 7) и *очень сильную* силу связи по шкале Чеккода (для воды ГВС – см. рис. 8) между значениями удельного сопротивления осадка r , концентрации замутнителя $C_{\text{н}}$, начальной влажности осадка $W_{\text{н}}$ и вида растворителя. Приведённые уравнения регрессии (см. рис. 7, 8) позволяют описывать зависимости $r = f(C_{\text{н}})$ с достаточно высокой точностью в исследованном диапазоне изменения параметров.

Выводы. 1. Анализом значений полученных коэффициентов парной корреляции R^2 зависимости $\text{pH} = f(C_{\text{н}})$ была установлена *очень сильная* связь по шкале Чеккода (табл. 3) между значениями pH и $C_{\text{н}}$ в *растворе и фильтрате*, где в качестве растворителя использовался *дистиллят* (рис. 2) и *практическое отсутствие* или *слабая связь* между этими величинами в аналогичных опытах с водой ГВС (рис. 3). Интенсивность роста значения pH в растворах дистиллята оказалась несколько выше, чем в растворах с водой ГВС.

2. Показано, что в *растворах* с истиллированной водой величина ОВП уменьшалась интенсивнее, чем в *фильтратах* (рис. 4). При этом в *растворах* коэффициент парной корреляции $R^2 \approx 0,90$ имел практически *функциональную* силу связи, а в *фильтратах* этого же раствора зависимость между величинами ОВП $= f(C_{\text{н}})$ *практически отсутствовала* ($R^2 \approx 0,24$). В растворах, использующих в качестве растворителя воду ГВС (рис. 5), связь между величинами ОВП $= f(C_{\text{н}})$ по шкале Чеддока (табл. 3), *практически отсутствовала*, а в *фильтрате* этого же раствора становилась уже *заметной* ($R^2 \approx 0,66$). Абсолютные значения ОВП были несколько бльше в растворе бентонитовой глины с дистиллятом, чем в растворе с водой ГВС.

3. Доказано, что скорость водоотдачи осадка r увеличивалась с ростом начальной влажности осадка $W_{\text{н}}$ и концентрации замутнителя

$C_{\text{н}}$ в исследуемом растворе, причем темп водоотдачи был выше в пробах, где использовалась вода с ГВС в качестве растворителя. *Интенсивность прироста* значения r ($J_{,}$) на *единицу увеличения концентрации замутнителя* $C_{\text{н}}$ была в 5,0–5,5 раза выше в дистиллированной воде по сравнению с водой ГВС. Абсолютные величины удельного сопротивления осадка в пробах с использованием дистиллята были выше, чем в растворах с водой из ГВС.

4. Полученные уравнения регрессии практически функционально описывают процессы изменения удельного сопротивления осадка в зависимости от его исходной влажности, начальной концентрации замутнителя и солевого состава растворителя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кичигин В.И., Землянова М.В., Вялкова Е.И. Исследование возможности использования СВЧ-излучения для обработки жидких коммунальных отходов // Градостроительство и архитектура. 2018. Т.8, №1. С.44–49. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.01.8.
2. Вялкова Е.И., Сидоренко О.В., Глущенко Е.С. Влияние пробиотических средств на качество очистки сточных вод предприятий молочной промышленности // Градостроительство и архитектура. 2020. Т.10, №1. С. 47–55. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.01.7.
3. Стройматериалы из промышленных отходов / Т.Б. Арбузова, В.А. Шабанов, С.Ф. Коренькова, Н.Г. Чумаченко. Самара: Кн. изд-во, 1983. 96 с.
4. Арбузова Т.Б. Утилизация глиноземсодержащих осадков промстоков / под ред. Т.В. Кузнецовой; изд-во Саратовского университета, Самарский филиал. Самара, 1992. 136 с.
5. Коренькова С.Ф., Шеина Т.В. Основы и концепция утилизации химических осадков промстоков в стройиндустрии / Самарск. гос.арх.-строит. ун-т. Самара, 2004. 203 с.
6. Самарские коммунальные системы [Электронный ресурс]. URL: <https://samcomsys.ru/connecting/14885> (дата обращения: 23.01.2023).
7. Кичигин В.И. Моделирование процессов очистки воды. М.: Изд-во АСВ, 2003. 230 с.
8. Кичигин В.И., Палагин Е.Д. Обработка и утилизация осадков природных и сточных вод / Самарск. гос. арх.-строит. ун-т. Самара, 2008. 204 с.
9. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. М.: ЛКИ, 2007. 448 с.

REFERENCES

1. Kichigin V.I., Zemlyanova M.V., Vyalkova E.I. Study of the possibility of using microwave radiation for the treatment of liquid municipal waste. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban construction and architecture], 2018, V.8, pp. 44–49. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2018.01.8

2. Vialkova E.I., Sidorenko O.V., Glushchenko E.S. Influence of probiotic products on the quality of waste water treatment in dairy industries. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2020, vol. 10, no. 1, pp. 47–55. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2020.01.7

3. Arbuzova T.B., Shabanov V.A., Korenkova S.F., Chumachenko N.G. *Strojmaterialy iz promyshlennyh othodov* [Building materials from industrial waste]. Samara, Ch. publishing house, 1983. 96 p.

4. Arbuzova T.B. *Utilizacija glinozemsoderzhashhih osadkov promstokov* [Utilization of alumina-containing sediments of industrial effluents]. Samara, 1992. 136 p.

5. Koren'kova S.F., Sheina T.V. *Osnovy i koncepcija utilizacii himicheskikh osadkov promstokov v strojindustrii* [Asics and concept of utilization of chemical sediments of industrial effluents in the construction industry]. Samara, 2004. 203 p.

6. Samara Utility Systems. Available at: <https://samcomsys.ru/connecting/14885> (accessed 23 January 2023).

7. Kichigin V.I. *Modelirovanie processov ochistki vody* [Modeling of water treatment processes]. Moscow, ASV Publishing House, 2003. 230 p.

8. Kichigin V.I., Palagin E.D. *Obrabotka i utilizacija osadkov prirodnyh i stochnyh vod* [Treatment and disposal of sediments of natural and wastewater]. Samara, 2008. 204 p.

9. Gnedenko B.V. *Kurs teorii veroyatnostej* [Probability Theory Course]. Moscow, LKI, 2007. 448 p.

Об авторах:

КИЧИГИН Виктор Иванович

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры водоснабжения и водоотведения
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: kichigin.viktr@rambler.ru

KICHIGIN Viktor I.

Doctor of Engineering Science, Professor of the Water
Supply and Wastewater Chair
Samara State Technical University
Academy of Civil Engineering and Architecture
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244
E-mail: kichigin.viktr@rambler.ru

ЮДИН Александр Александрович

аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: alex.udin1996@mail.ru

IUDIN Aleksandr A.

Postgraduate Student of the Water Supply and
Wastewater Chair
Samara State Technical University
Academy of Civil Engineering and Architecture
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244
E-mail: alex.udin1996@mail.ru

Для цитирования: Кичигин В.И., Юдин А.А. Исследование зависимости удельного сопротивления осадка от его влажности и исходной концентрации бентонитового замутнителя // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13, № 2. С. 22–30. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.02.4.

For citation: Kichigin V.I., Yudin A.A. Investigation of the Dependence of Sediment Specific Resistance on its Humidity and Initial Concentration Bentonite Haddener. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2023, vol. 13, no. 2, pp. 22–30. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2023.02.4.