

## УДАЛЕНИЕ ГИПСА ИЗ ОБОРОТНОЙ ВОДЫ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА

Способ ультразвуковой обработки используется для стабилизации нейтрализованных известковым молоком сульфатсодержащих промывных вод. Ранее [1] проведены предварительные исследования по удалению сульфата кальция из оборотной воды при обработке ее ультразвуком. В качестве факторов, которые влияют на кристаллизацию сульфата кальция, рассматривались интенсивность и длительность озвучивания, частота колебаний, температура и pH раствора, исходная концентрация сульфата кальция в воде, разрыв во времени между концом нейтрализации стока и началом озвучивания.

Нами изучено взаимодействие основных технологических факторов, характеризующих раствор и режим его обработки: температуры и концентрации раствора, интенсивности и продолжительности озвучивания.

Проведены опыты с фильтрованными и нефильрованными водами, с ультразвуковой обработкой во время и после нейтрализации промывных вод. Озвучивание промывных вод во время нейтрализации способствует возрастанию скорости кристаллизации сульфата кальция, но в меньшей степени, чем при озвучивании предварительно нейтрализованных промывных вод. Разницу в скоростях кристаллизации можно объяснить ненасыщенностью раствора по сульфату кальция в начале нейтрализации, так как процесс образования сульфата кальция происходит не мгновенно, поэтому сильное воздействие ультразвук оказывает только в конце нейтрализации. Исследования показали, что в нефильрованных водах процесс кристаллизации сульфата кальция идет интенсивнее за счет образовавшихся его зародышей.

Для исключения активирующего влияния кристаллов гипса на дальнейший процесс кристаллизации модельную воду, нейтрализованную до  $\text{pH } 9 \pm 0,1$ , отфильтровывали. Дополнительное воздействие на кристаллизацию сульфата кальция может оказывать наличие посторонних ионов в водопроводной воде, поэтому чтобы исключить это влияние, модельную промывную воду и известковое молоко (10 % по CaO) готовили на дистиллированной воде. Нейтрализованную и отфильтрованную воду объемом 500 мл быстро подогревали (2–4 мин), если это было необходимо по условиям опыта, на кипящей водяной бане и подвергали ультразвуковому воздействию в соответствии с планом эксперимента. Обработанные воды помещали в термостатируемую ванну для отстаивания, где температура поддерживалась с точностью  $\pm 0,5$  °C. Анализы на содержание  $\text{CaSO}_4$  проводили по иону кальция. В каждом опыте проведено по три параллельных испытания. В качестве источника ультразвуковых колебаний использован диспергатор типа УЗДН-1. Частота ультразвука 15 кГц.

Чтобы более полно выявить силу воздействия названных ранее факторов и их взаимодействий на процесс кристаллизации сульфата кальция во время ультразвуковой обработки, был реализован полный факторный эксперимент

типа 2<sup>4</sup>. [2–4]. В табл. 1 приведены пределы варьирования факторов, выбранных с таким расчетом, чтобы охватить основные показатели.

В качестве параметров оптимизации принята остаточная концентрация сульфата кальция в воде после ультразвуковой обработки через 30, 60, 120 и 240 мин отстаивания без перемешивания. Матрица планирования эксперимента и осредненные результаты опытов приведены в табл. 2.

На основании статистического анализа полученных данных [2–4] установлено, что значения дисперсии опытов однородны, ошибка составляет  $95 \pm \pm 30$  мг/л, доверительный интервал коэффициентов уравнений регрессии 24–47, максимальное значение критерия Фишера (опытного) не превышает 1,86 при табличном его значении 2,35, т. е. уравнения регрессии адекватны опытными данным.

Обработка результатов дала возможность получить математическое описание процесса в виде уравнений (1–5), устанавливающих зависимость остаточного содержания сульфата кальция в определенный момент времени от рассматриваемых факторов:

$$Y_1 = C_{3B} = 3865 - 366X_1 - 195X_2 - 537X_3 + 479X_4 - 86X_1X_2 - 257X_1X_3 - 219X_1X_4 - 99X_2X_3 - 62X_2X_4 - 407X_3X_4 - 116X_1X_3X_4 + 48X_2X_3X_4 + 96X_1X_2X_3X_4; \quad (1)$$

$$Y_2 = C_{30} = 3557 - 229X_1 - 178X_2 - 749X_3 - 277X_4 - 116X_1X_2 - 55X_1X_3 - 48X_1X_4 - 89X_2X_4 - 544X_3X_4 + 120X_1X_3X_4 + 96X_2X_3X_4 + 96X_1X_2X_3X_4; \quad (2)$$

$$Y_3 = C_{60} = 3454 - 219X_1 - 144X_2 - 807X_3 + 263X_4 - 123X_1X_2 - 44X_1X_4 - 44X_2X_3 - 82X_2X_4 - 534X_3X_4 + 140X_1X_3X_4 - 44X_1X_2X_4 + 127X_2X_3X_4 + 82X_1X_2X_3X_4; \quad (3)$$

$$Y_4 = C_{120} = 3352 - 181X_1 - 157X_2 - 869X_3 + 239X_4 - 99X_1X_2 - 51X_1X_4 + 89X_2X_3 - 113X_2X_4 - 489X_3X_4 - 24X_1X_2X_3 + 137X_1X_3X_4 - 34X_1X_2X_4 + 150X_2X_3X_4 + 89X_1X_2X_3X_4; \quad (4)$$

$$Y_5 = C_{240} = 3181 - 123X_1 - 171X_2 - 869X_3 + 205X_4 - 51X_1X_2 + 41X_1X_3 - 48X_1X_4 + 120X_2X_3 - 133X_2X_4 + 363X_3X_4 + 106X_1X_3X_4 + 174X_2X_3X_4 + 44X_1X_2X_3X_4. \quad (5)$$

Проверка уравнений показала, что линейная часть математических моделей не адекватна опытными данным (максимальное отклонение расчетного значения остаточной концентрации отличается от опытного на 35%). Адекватное уравнение регрессии получается только с учетом всех значимых эффектов взаимодействия. С целью их упрощения при оценке состояния системы следует 1 или 2 фактора брать на нулевом уровне, что приведет к значительному сокращению уравнений в кодированных переменных. Расхождение между опытами и расчетными данными не превышает  $\pm 5\%$ . Каждое из уравне-

Пределы варьирования факторов

Показатели	Температура, °С	Исходная концентрация, мг/л	Интенсивность ультразвука, Вт/см <sup>2</sup>	Продолжительность озвучивания, мин
Кодовые обозначения	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Верхний уровень (+)	60	5500	31	19
Нижний уровень (-)	20	3500	1	1

Таблица 2

Матрица планирования и результаты эксперимента

Номера опытов	Факторы				Остаточная концентрация, мг/л				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y_1$ $C_{3В}$	$Y_2$ $C_{30}$	$Y_3$ $C_{60}$	$Y_4$ $C_{120}$	$Y_5$ $C_{240}$
1	+	+	+	+	2155	2103	2103	2086	2086
2	-	+	+	+	4019	2599	2565	2291	2189
3	+	-	+	+	2719	2548	2377	2189	2155
4	+	+	-	+	4754	4207	4036	3796	3557
5	+	+	+	-	2411	2326	2291	2223	2172
6	-	-	+	+	4685	2890	2497	2309	2155
7	-	+	-	+	5404	5335	5301	5062	4463
8	+	-	-	+	5387	5352	5335	5301	5027
9	-	-	-	+	5592	5592	5592	5575	5387
10	-	+	+	-	3488	3437	3283	2993	2565
11	+	-	+	-	3475	3112	2890	2702	2462
12	-	-	+	-	3557	3420	3249	2441	2633
13	+	+	-	-	3488	3488	3488	3488	3488
14	-	+	-	-	3506	3506	3506	3506	3488
15	+	-	-	-	3471	3453	3437	3437	3437
16	-	-	-	-	3471	3471	3471	3471	3471

ний описывает процесс кристаллизации сульфата кальция в фиксированный момент времени. Анализ уравнений (1–5) показывает влияние температуры ( $X_3$ ) на процесс удаления сульфата кальция из его пересыщенных растворов во всем исследуемом промежутке времени – с повышением температуры снижается остаточная концентрация сульфата кальция. Процесс кристаллизации существенно зависит от исходной концентрации  $\text{CaSO}_4$  ( $X_4$  – увеличение исходной концентрации сульфата кальция ведет к увеличению его остаточного содержания, но зависимость эта в 1,75 раза уменьшается после 30-минутного отстаивания. Можно сделать вывод, что скорость удаления сульфата кальция под воздействием ультразвука в начале процесса наибольшая, после 30-минутного отстаивания – уменьшается, остаточная концентрация  $\text{CaSO}_4$  стремится к равновесной. Об этом свидетельствует незначительное уменьшение коэффициентов при  $X_4$  в уравнениях (1–5).

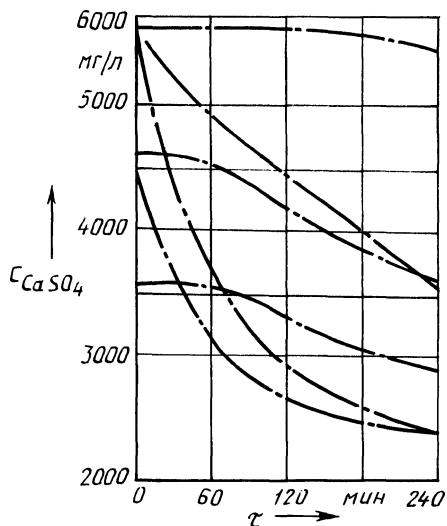


Рис. 1. Кристаллизация сульфата кальция из оборотной воды без обработки ее ультразвуком. Начальная концентрация  $\text{CaSO}_4$  (мг/л) в воде: 1,1'; 1'' — 5500; 2,2'; 2'' — 4500; 3,3'; 3'' — 3500 при температурах обработки 20, 40, 60 °C

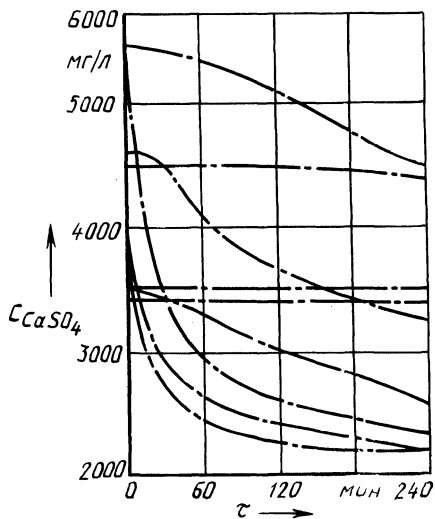


Рис. 2. Кристаллизация сульфата кальция из оборотной воды при обработке ее ультразвуком в течение 1 мин при интенсивности  $31 \text{ Вт/см}^2$ . Начальная концентрация  $\text{CaSO}_4$  (мг/л) в воде: 1,1'; 1'' — 5500; 2,2'; 2'' — 4500; 3,3'; 3'' — 3500 при температурах 20, 40 и 60 °C

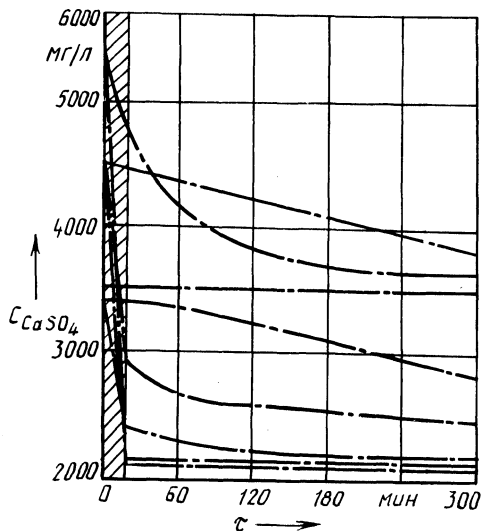


Рис. 3. Кристаллизация сульфата кальция из оборотной воды при обработке ее ультразвуком в течение 19 мин при интенсивности  $31 \text{ Вт/см}^2$ . Начальная концентрация  $\text{CaSO}_4$  (мг/л) в воде: 1,1'; 1'' — 5500; 2,2'; 2'' — 4500; 3,3'; 3'' — 3500 при температурах 20, 40 и 60 °C

Существенное влияние оказывает продолжительность озвучивания. С течением времени, и в частности через 240 мин, оно уменьшается по сравнению с другими факторами. Из всех изучаемых факторов интенсивность озвучивания в чистом виде вносит меньший вклад в кристаллизацию. Коэффициенты при этом факторе в 4–6 раз больше доверительных интервалов, следовательно, этот фактор также оказывает влияние на ход процесса кристаллизации — чем больше интенсивность озвучивания, тем меньше остаточная концентрация сульфата кальция.

На рис. 1–3 приведены кривые кристаллизации сульфата кальция из пересыщенных растворов в зависимости от температуры, исходной концентрации сульфата кальция, интенсивности и длительности озвучивания. Раствор, не обработанный ультразвуком (рис. 1), при самых благоприятных условиях (температура 60 °С и начальная концентрация 4500 и 5500 мг/л  $\text{CaSO}_4$ ) к стабильному состоянию подходит через 240 мин отстаивания. Использование ультразвука интенсивностью 31 Вт/см<sup>2</sup> при 1 мин озвучивания позволяет достигнуть такого же результата через 60–120 мин (рис. 2), а при длительности озвучивания 19 мин пересыщение полностью снимается во время озвучивания. Такой же эффект получается при температуре 40 °С для исходной концентрации сульфата кальция 5500 мг/л. Раствор с концентрацией сульфата кальция 3500 мг/л к стабильному состоянию при 60 °С приходит через 120 мин после обработки. Таким образом, ультразвуковая обработка при температуре 40–60 °С оборотных промывных вод в десятки раз увеличивает скорость кристаллизации сульфата кальция из растворов, что позволяет стабилизировать их и предотвратить гипсовые отложения в трубопроводах.

Рассмотренный способ стабилизации оборотной воды не требует изменения существующих технологических схем их обработки. Для его осуществления достаточно в камере реакции разместить ультразвуковые вибраторы и соединить их с генератором ультразвука.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б у д е к а Ю.Ф., М о й ч е н к о В.А. Удаление сульфата кальция из оборотной воды при обработке ее ультразвуком // Использование и охрана водных ресурсов / ЦНИИКИВР, 1976. — С. 182–188.
2. Н а л и м о в В.В., Ч е р н о в а М.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. — М., 1965. — 143 с.
3. Э л ь - п е р В.Л., Б р у к - Л е в и н с о н Т.А., Р я б и к о в Г.Т. Опыт применения математического планирования эксперимента в исследованиях по очистке воды. — Минск, 1971. — 14 с.
4. Т и х о м и р о в В.Б. Планирование и анализ эксперимента. — М., 1974. — 321 с.

УДК 631.67:633.2/3]:631.445.2 (476)

В.И.ВИХРОВ (БСХА)

### ПРОГНОЗ ВЕСЕННИХ ВЛАГОЗАПАСОВ СУГЛИНИСТЫХ ПОЧВ ПОД ОРОШАЕМЫМИ МНОГОЛЕТНИМИ ТРАВАМИ В БЕЛОРУССИИ

В основу проектного и эксплуатационного режимов орошения сельскохозяйственных культур положен расчет динамики влагозапасов почвы. Обоснованность этих расчетов во многом зависит от точности