

УДК 628.334.51:622

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В ДЕЙСТВУЮЩЕМ МАКЕТЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ОТСТОЙНИКА ШАХТНЫХ ВОД

*В.Е Колесник, д-р техн. наук, проф.,
Д.В.Куликова, ассистент
(ГБУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск)*

Исследован процесс осаждения частиц взвешенных веществ в макете отстойника. Построены кривые выпадения частиц взвеси в зависимости от продолжительности процесса отстаивания при разной высоте слоя жидкости и средней скорости осаждения взвешенных частиц (гидравлической крупности). Определено расстояние, на котором частицы взвеси различной гидравлической крупности выпадут на дно макета при обеспечении величин заданного эффекта очистки шахтных вод.

Досліджено процес осадження часток завислих речовин у макеті відстійника. Побудовані криві випадіння часток зависі в залежності від тривалості процесу відстоювання при різній висоті шару рідини та середній швидкості осадження завислих часток (гідравлічної крупності). Визначено відстань, на якій частки зависі різної гідравлічної крупності випадають на дно макету при забезпеченні величин заданого ефекту очистки шахтних вод.

The physical modeling of process of deposition of the suspended materials in experimental model of sedimentation tank is conducted. The graphical layouts of deposition of the suspended particles subject to duration of process of settling at the different height of layer of the liquid and average speed settling of the suspended materials (hydraulic size of particles) are built. Distance on which the suspended particles of different hydraulic size will fall out on the bottom of experimental model of sedimentation tank at providing of the purification efficiency of mine waters is determined.

На большинстве угледобывающих предприятий Украины наиболее распространенным методом механической очистки шахтной воды является процесс отстаивания, при котором под действием силы тяжести происходит осе-

© В.Е Колесник, Д.В. Куликова, 2012

Розділ 2. Основи природокористування та безпека життєдіяльності

дание взвешенных примесей на дно отстойных сооружений. На динамику осаждения частиц примеси влияют их размер и форма, плотность вещества, режим движения очищаемой воды и ее вязкость, изменяющаяся с температурой. Это осложняет установление закономерностей осаждения частиц взвеси в шахтной воде без предварительного исследования кинетики их выпадения в осадок. Причем получить необходимые зависимости удается преимущественно экспериментальным путем.

Для повышения эффективности очистки шахтной воды от содержащихся в ней взвешенных частиц, авторами предложена усовершенствованная конструкция горизонтального отстойника [1]. Техническое решение относится к способам механической очистки промышленных сточных вод от нерастворимых и частично коллоидных загрязнений минерального и органического происхождения методом гравитационного отстаивания в потоке, близком к ламинарному режиму течения.

Целью данной работы является исследование процесса осаждения взвешенных частиц на физической модели – действующем макете предложенного отстойника, которое заключается в определении расстояния, на котором будет обеспечено осветление воды с задаваемым эффектом ее очистки.

По результатам исследований в лабораторных условиях определялись параметры реального отстойника, в частности, скорости осаждения частиц взвеси, при которых обеспечивается заданный эффект осветления (очистки) воды, а также необходимая для этого продолжительность отстаивания.

Результаты экспериментальных исследований представлялись в виде графических и аналитических зависимостей выпадения в осадок частиц разного размера, получаемых при различных высотах столба очищаемой жидкости, с последующим определением количества выпавших частиц взвеси или требуемой эффективности очистки воды в любой момент времени процесса осаждения.

Критерием подобия процесса осаждения частиц взвеси в действующем макете и в реальном отстойнике является сохранение режима течения, а также удельного количественного и гранулометрического составов взвеси.

За счет размещения в поперечных сечениях предложенного отстойника трех равномерно расположенных по его длине перегородок с отверстиями, происходит выравнивание скорости потока очищаемой воды по сечению с одновременным приданием течению однонаправленного ламинарного характера. Это повышает эффективность седиментации частиц взвеси и способствует интенсификации процесса осаждения твердых частиц и примесей различной гидравлической крупности и плотности веществ.

Исходными данными для исследования кинетики выпадения взвешенных веществ и построения искомых зависимостей послужили сведения о гранулометрическом составе осадка шахтной воды из водосборников некоторых шахт [2]. На основе анализа этих данных, был установлен приблизительный

гранулометрический состав осадка взвешенных частиц, содержащихся в шахтной воде, приведенный в табл. 1.

Таблица 1

Приблизительный гранулометрический состав осадка взвешенных веществ, содержащихся в шахтной воде

Крупность фракций, мкм	Содержание фракции, %
менее 5	35,6
5-10	12,3
10-20	14,0
20-30	12,8
30-50	13,5
более 50	11,8

В соответствии с установленным гранулометрическим составом, были подобраны 5 типов примесей, размер частиц которых отвечает фракциям взвешенных веществ, содержащихся в реальном осадке шахтных вод, представленным в табл. 1. Тип примесей, выбранных в качестве экспериментальных для проведения физического моделирования процесса осаждения взвешенных веществ, и приблизительный размер их частиц приведены в табл. 2.

С учетом табл. 1 и 2 готовился водный раствор для исследования кинетики осаждения частиц. Концентрация взвеси в растворе составила 200 мг/л при содержании в нем тонкозернистого песка – 11,8%, ила крупного – 26,3%, пылевидной массы – 14%, ила мелкого – 12,3% и глины – 35,6%.

Таблица 2

Тип примесей для проведения физического моделирования процесса осаждения взвешенных веществ и приблизительный размер их частиц

Тип примеси	Приблизительный размер частиц взвеси, d, мкм
Тонкозернистый песок	более 50
Ил крупный	27
Пылевидная масса	15
Ил мелкий	10
Глина	3 (2,7)

Отметим, что глубина отстойника по мере приближения к месту слива осветленной воды возрастает, а в месте впуска воды в рабочую зону она приблизительно равна нулю. Поэтому осаждение частиц на дно должно начинаться уже в области впуска воды в отстойник. Однако, при изучении основных гидравлических элементов потока на действующем макете отстойника

Розділ 2. Основи природокористування та безпека життєдіяльності

[3] установлено, что на участке от впуска очищаемой воды до первой перегородки наблюдаются пульсации скорости течения с интенсивным турбулентным перемешиванием воды, вследствие чего поток увлекает частицы, не давая им осесть. Поэтому начальную глубину осаждения взвешенных частиц определяем как высоту первой перегородки отстойника ($h_{\text{осаждения}}=7,5$ см), за которой движение жидкости приобретает устойчивый ламинарный характер.

Поскольку глубина отстойника является величиной переменной по длине, выбираем 4 поперечных сечения в макете, высоты которых будут служить опорными при проведении экспериментальных исследований седиментации частиц. В качестве упомянутых сечений выберем места размещения трех перегородок и граничной торцевой стенки. Измерением высоты перегородок и торцевой стенки получили: $h_1=7,5$ см (глубина макета в области первой перегородки); $h_2=21,5$ см (аналогичная глубина у второй перегородки); $h_3=36,0$ см (у третьей перегородки); $h_4=54,0$ см (высота граничной торцевой стенки макета отстойника).

Исследования кинетики осаждения на дно взвешенных веществ, содержащихся в воде, проводились в стеклянных цилиндрах-седиментаторах. Уровень очищаемой воды в них устанавливался согласно значениям h_1-h_4 . Продолжительность отстаивания составляла до 5 часов.

Результаты экспериментов по определению количества взвешенных веществ, оседающих в цилиндре-седиментаторе, в зависимости от изменения продолжительности процесса отстаивания загрязненной воды при различной высоте слоя жидкости и среднем значении гидравлической крупности частиц взвеси (численно равной скорости осаждения частиц) для задаваемого эффекта осветления (очистки) воды представлены в табл. 3.

Таблица 3

Зависимость эффекта осветления шахтной воды от продолжительности процесса отстаивания при различной высоте слоя жидкости и скорости осаждения частиц взвеси

Эффект осветления (очистки) воды (Э), %	Продолжительность отстаивания t, с, при высоте слоя воды h, см				Средняя гидравлическая крупность частиц взвеси U_0 , мм/с
	7,5	21,5	36,0	54,0	
10	60	120	200	300	1,66
24	120	360	600	900	0,61
38	240	720	1200	1800	0,3
50	480	1440	2400	3600	0,152
60	1020	2880	4800	7200	0,075
73	2400	7200	12000	18000	0,03
81	3600	10800	18000	-	0,02
85	5400	14400	-	-	0,015

Отметим, что эффект очистки воды оценивался процентной величиной количества осевших на дно седиментатора частиц различного типа из приготовленного раствора. Их количество определялось по стандартной методике [4] путем периодического отбора проб осветляемой воды, которая выпаривалась, с последующим определением массы не осевшей взвеси. Масса осадка определялась как разница между начальной массой взвеси и ее массой в растворе.

По данным табл. 3 построены зависимости эффекта осветления воды от продолжительности процесса отстаивания при различной высоте слоя жидкости (рис. 1, а) и скорости оседания, которая определяется их средней гидравлической крупностью (рис. 1, б).

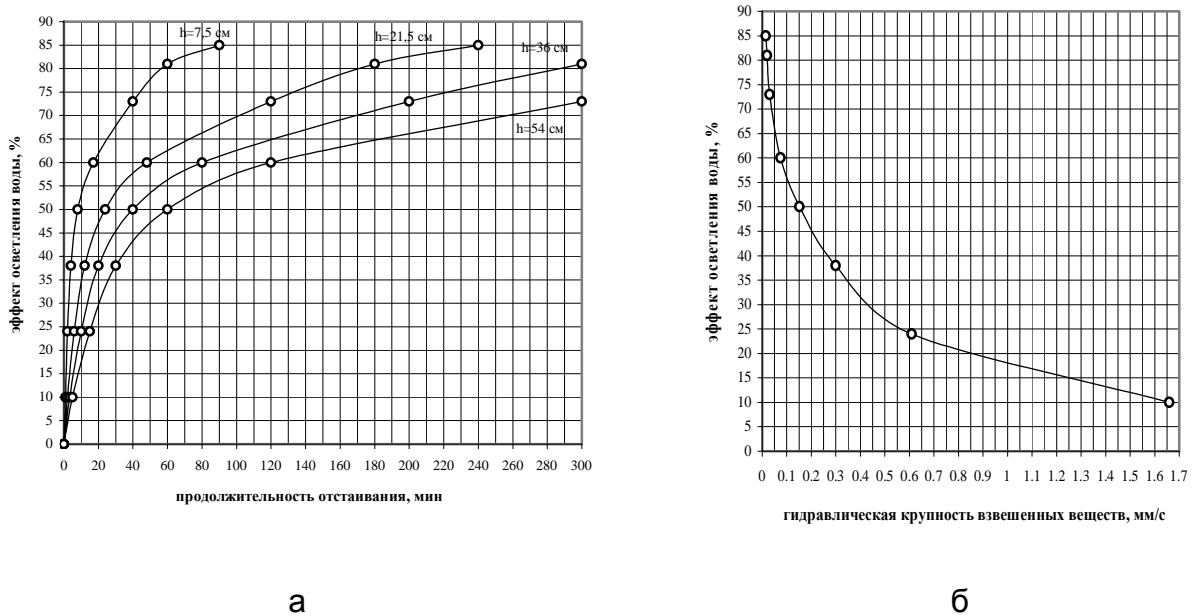


Рис. 1. Зависимости изменения эффекта осветления воды, содержащей взвешенные вещества, от продолжительности процесса отстаивания при различной высоте слоя жидкости (а) и скорости осадения частиц взвеси (б)

Построенные на рис. 1, а графики величины эффекта осветления воды, содержащей взвешенные вещества, и продолжительности процесса отстаивания при различной высоте слоя жидкости удобно представить моделями в виде логарифмической зависимости, которая после аппроксимации данных имеет следующий вид:

- при глубине $h=7,5$ см – $y = 16,498 \cdot \ln(x) + 12,875$, достоверность аппроксимации $R^2 = 0,995$;
- при глубине $h=21,5$ см – $y = 15,886 \cdot \ln(x) - 1,9433$, $R^2 = 0,9978$;
- при глубине $h=36$ см – $y = 15,901 \cdot \ln(x) - 10,095$, $R^2 = 0,9972$;
- при глубине $h=54$ см – $y = 15,817 \cdot \ln(x) - 16,296$, $R^2 = 0,996$.

Аналогично, построенный на рис. 1, б график тоже представлялся

Розділ 2. Основи природокористування та безпека життєдіяльності

логарифмической зависимостью:

$$y = -16,037 \cdot \ln(x) + 17,978, R^2 = 0,9982.$$

Таким образом, в результате проведенного физического моделирования процесса осаждения взвешенных веществ получены графические и аналитические зависимости выпадения частиц взвеси от продолжительности процесса отстаивания при различной высоте слоя жидкости и средней скорости осаждения взвешенных частиц (или их гидравлической крупности). Полученные зависимости позволяют определить процентное количество частиц взвеси, осаждающихся в течение любого заданного промежутка времени не только в макете, но и в реальном отстойнике. Кроме того, можно найти процентное содержание различных фракций взвеси с соответствующей гидравлической крупностью частиц.

Теперь оценим характер оседания взвеси в макете отстойника. Обращаем внимание на то, что в отстойнике каждая частица движется с потоком жидкости в горизонтальном направлении через отверстия перегородок со скоростью v_{cp} и одновременно оседает на дно под действием силы тяжести со скоростью U_0 . Поэтому скорость и направление перемещения каждой взвешенной частицы представляют равнодействующую этих двух скоростей [5]. Результирующая скорость, в конечном итоге, определяет ниспадающую траекторию частиц взвеси вплоть до оседания их на дно отстойника, аналитический вид которой для любой фракции определить весьма сложно. Поэтому ограничимся оценкой величины участка осаждения частиц при разной глубине отстойника.

Между временем прохождения частиц взвешенных веществ по сечению отстойника (t_r) и продолжительностью выпадения частиц взвеси на его дно (t_b) должно выполняться условие $t_r \geq t_b$ [5].

$$\text{При этом } t_r = \frac{L}{v_{cp}} \text{ и } t_b = \frac{h}{U_0},$$

где L – длина анализируемого участка отстойника, см; v_{cp} – скорость движения потока жидкости, проходящей через сечения перегородок отстойника, см/с; h – рабочая глубина отстойника в расчетном сечении, увеличивающаяся по направлению к месту выпуска осветленной жидкости, см; U_0 – скорость осаждения частиц взвешенных веществ (или гидравлическая крупность), мм/с.

Участок (L), на котором частицы взвешенных веществ выпадут на дно отстойника, можно рассчитать по формуле:

$$L = \frac{h \cdot v_{cp}}{U_0}. \quad (1)$$

Выразим среднюю скорость потока как

$$v_{cp} = \frac{Q}{S \cdot k},$$

где Q – величина шахтного водоотлива, м³/с; S – рабочая площадь перегородок, м²; k – коэффициент, который характеризует отношение площади отверстий в перегородках к их общему сечению или коэффициент пропускания воды через сечения перегородок (при диаметре отверстий d=0,3 см, k=0,403).

Рабочую площадь перегородки S на расстоянии L от места впуска очищаемой воды в отстойник вычислим как

$$S = (b - 2 \cdot L \cdot ctg\beta) \cdot h,$$

где b – ширина перегородки, см (рис. 2); угол β – угол сужения отстойника (рис. 2), подобранный так, чтобы обеспечить приблизительно одинаковый расход жидкости в каждом поперечном сечении всех распределительных перегородок, установленных по направлению движения рабочего потока (в исследуемом макете отстойника $ctg\beta = 0,1692$).

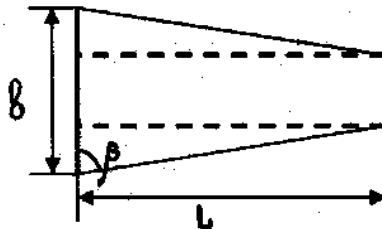


Рис. 2. Схема макета отстойника (вид сверху)

Подставляем расчетные соотношения в формулу (1). Получим

$$L = \frac{h \cdot Q}{(b - 2 \cdot L \cdot ctg\beta) \cdot h \cdot U_0 \cdot k} = \frac{Q}{(b - 2 \cdot L \cdot ctg\beta) \cdot U_0 \cdot k}. \quad (2)$$

После преобразований получаем квадратное уравнение относительно L:

$$L^2 - \frac{b}{2 \cdot ctg\beta} \cdot L + \frac{Q}{2 \cdot U_0 \cdot k \cdot ctg\beta} = 0. \quad (3)$$

Аналитическое решение уравнения (3) имеет вид:

$$L_{1,2} = \frac{b}{4 \cdot ctg\beta} \pm \sqrt{\left(\frac{b}{4 \cdot ctg\beta}\right)^2 - \frac{Q}{2 \cdot k \cdot U_0 \cdot ctg\beta}}. \quad (4)$$

Розділ 2. Основи природокористування та безпека життєдіяльності

Результаты расчетов расстояния L по формуле (4) при задаваемом эффекте очистки (путем изменения величины гидравлической крупности), согласно табл.3, и указанной выше высоте перегородок h при k=0,403 представлены в табл. 4 (при этом выбраны действительные решения уравнения).

Таблица 4

Расстояние, на котором частицы взвешенных веществ различной гидравлической крупности выпадут на дно макета отстойника переменной глубины

Эффект очистки воды (Э), %	Расстояние (от места впуска сточных вод) L, см, на котором частицы выпадут на дно отстойника при высоте слоя воды, соответствующего высоте перегородок h, см		
	h =7,5	h =21,5	h =36,0
10	25,34	49,06	74,32
24	30,58	55,95	84,95
38	40,49	71,18	164,5
50	77,07	173,5	178,8
60	190	194,8	201,8
73	233,5	240,5	248,5
81	262,5	268,5	278,5
85	287,5	295,5	304,5

Как видим, наибольший эффект очистки в 85% для выбранных значений слоя воды будет достигнут при длине отстойника около 3 м. Поскольку длина изготовленного макета отстойника составляет L=100 см (1 м), оценим эффект очистки воды на его выходе (для k=0,403).

Приведенные в табл. 4 результаты целесообразно представить в виде зависимостей изменения глубины осаждения частиц взвешенных веществ различной гидравлической крупности от расстояния, на котором они выпадут на дно макета при заданном эффекте очистки и высоте его перегородок (рис. 3).

Выше показано, что расстояние, на котором частицы взвеси различной гидравлической крупности выпадут на дно макета отстойника описываются квадратным уравнением, поэтому с учетом степени очистки воды их удобно аппроксимировать полиномом второго порядка, т.е. ветвью параболы:

- при эффекте очистки Э=10% (для частиц взвешенных веществ с гидравлической крупностью $U_0=1,66$ мм/с):

$$y = -0,0003 \cdot x^2 + 0,6148 \cdot x - 7,8671, R^2 = 1;$$

- при эффекте очистки Э=24% (для частиц взвеси с $U_0=0,61$ мм/с):

$$y = -0,001 \cdot x^2 + 0,6343 \cdot x - 11,006, R^2 = 1;$$

- при эффекте очистки Э=38% (для частиц взвеси с $U_0=0,3$ мм/с):

$$y = -0,0024 \cdot x^2 + 0,727 \cdot x - 17,961, R^2 = 1;$$

- при эффекте очистки $\Theta=50\%$ (для частиц взвеси с $U_0=0,152$ мм/с):

$$y = 0,0255 \cdot x^2 - 6,2359 \cdot x + 336,83, R^2 = 1.$$

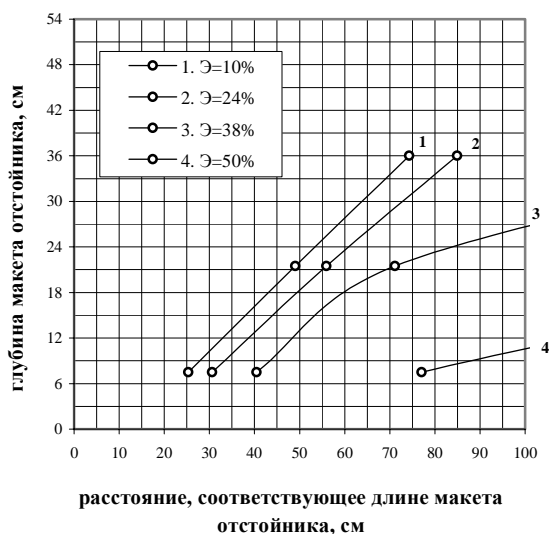


Рис. 3. Зависимости изменения глубины осаждения частиц взвешенных веществ различной гидравлической крупности от расстояния при заданном эффекте очистки и высоте уровня воды

Пользуясь полученными зависимостями, можно определить глубину осаждения частиц взвешенных веществ различной гидравлической крупности в месте выпуска осветленной жидкости в водосливной карман, расположенный на граничной торцевой стенке макета отстойника (при его общей длине $L=100$ см). Результаты расчетов представлены в табл. 5. и на рис. 4.

Таблица 5

Глубина осаждения взвешенных частиц различной гидравлической крупности при заданной величине эффекта очистки и длине макета отстойника

Эффект очистки воды (Θ), %	Глубина осаждения частиц взвеси h_i , см
10	50,61
24	42,42
38	30,74

Полученную на рис. 4 зависимость глубины осаждения частиц взвешенных веществ различной гидравлической крупности – y и эффективность очистки воды – x при заданной длине макета отстойника $L=100$ см тоже можно представить полиномом второго порядка:

$$y = -0,0089 \cdot x^2 - 0,2823 \cdot x + 54,323, R^2 = 1.$$

Розділ 2. Основи природокористування та безпека життєдіяльності

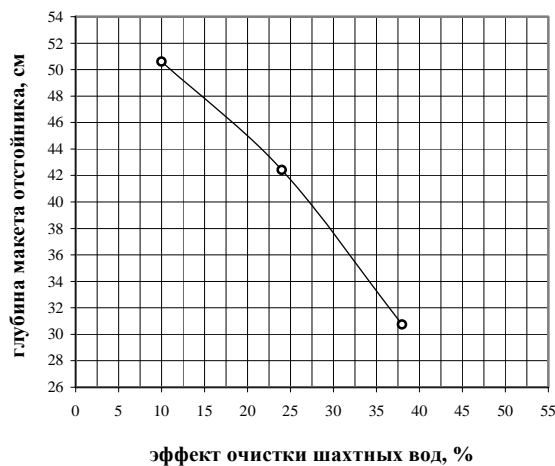


Рис. 4. Зависимость изменения глубины осаждения частиц взвешенных веществ различной гидравлической крупности от величины эффекта очистки воды при заданной длине макета отстойника

Ета залежність дозволяє орієнтовочно визначити, на якій глибині опадуть частинки взвешених речовин різної гідравлічної крупності, якщо ефект очищення становить більше 38%.

В результаті проведених досліджень встановлено, що при заданій величині расхода води Q і коефіцієнті пропускання її через отвір перекриття відстійника – $k=0,403$, довжина якого становить 100 см, в пропонуваній конструкції зможуть осісти частинки взвеси з гідравлічної крупністю $U_0=1,66-0,073$ мм/с.

В місці випуску освітленої води з макета відстійника задавана ефективність очищення води для частинок різної крупності досягається на різній глибині. Так, ефективність очищення, що становить $\Theta=45\%$, може бути досягнута при осадженні частинок взвеси з $U_0=0,185$ мм/с на глибину $h=23,6$ см від поверхні води. При $\Theta=50\%$ частинки взвешених речовин з $U_0=0,135$ мм/с опустяться на глибину $h=17,96$ см. При $\Theta=55\%$ частинки взвеси з $U_0=0,099$ мм/с опадуть на глибину $h=11,87$ см. Найменш мелкі частинки взвеси, гідравлічна крупність яких становить $U_0=0,073$ мм/с, зможуть опуститися на глибину, рівну $h=5,35$ см, при цьому ефективність очищення очищеної води, що сливається на виході з відстійника, становитиме вже $\Theta=60\%$.

Висновки. При заданих геометричних і гідравлічних параметрах макета пропонуваного відстійника і типовому дисперсному складі взвешених речовин, що містяться в шахтній воді, кількість випавших в осадок частинок взвеси буде становити приблизно 60%. Це практично вдвічі вище ефективності очищення в традиційних горизонтальних відстійниках, встановлених на вугледобувальних підприємствах. (В традиційних відстійниках ефект освітлення води становить в середньому 30%, а значить, в осадок випадають

лишь довольно крупные частицы, гидравлическая крупность которых превышает $U_0=0,47$ мм/с).

Полученные аналитические зависимости можно использовать в расчетах реального отстойника предложенной конструкции.

* * *

1. Горова А.І. Удосконалення споруд механічної очистки шахтних вод /- А.І. Горова, В.Є. Колесник, Д.В. Кулікова //Науковий Вісник «Національного гірничого університету». – 2011. - №5.

2. Горшков В.А. Очистка и использование сточных вод предприятий угольной промышленности / В.А. Горшков – М.: Недра, 1981. – 269 с.

3. Колесник В.Е. Экспериментальные исследования усовершенствованного горизонтального проточного отстойника шахтной воды на действующем макете /- В.Е. Колесник, Д.В. Куликова //Матеріали Міжнародної конференції «Форум гірників-2011». – 2011.

4. Руководство по анализу шахтных вод – Пермь: ВНИИОСуголь, 1980. – 283 с.

5. Николин В.И. Охрана окружающей среды в горной промышленности / В.И.Николин , Е.С. Матлак – К., Донецк: Вища школа, 1987. – 192 с.

Отримано: 17.05.2012 р.