

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЙВАНИЯ ШАХТНЫХ ВОД В АКВАТОРИИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Наведено результати фізичного експерименту з моделювання скиду шахтних вод Криворізького регіону в акваторію Чорного моря. Експеримент був проведений у гідравлічному лотку.

*Ключові слова:* скид шахтних вод, забруднення моря

Представлены результаты физического эксперимента по моделированию сброса шахтных вод Криворожского региона в акваторию Черного моря. Эксперимент проведен в гидравлическом лотке.

*Ключевые слова:* сброс шахтных вод, загрязнение моря

An experiment to model the mine waste waters discharge into the Black Sea was carried out. The experiment was held in the water channel. Some experimental results are presented.

*Keywords:* mine waste waters discharge, sea contamination

### Введение

Сегодня в Криворожском бассейне работает 5 мощных горно-обогатительных комбинатов и 8 шахт, которые ведут добычу руды в 10 карьерах открытым способом на глубинах 300...500 метров и в подземных условиях от 500 до 1200 метров, в которых добывают до 130 млн т/год железорудного сырья. Для поддержки благоприятного гидрологического режима добычи железорудного сырья и недопущения затопления отработанного пространства в бассейне в течение последних лет откачивается около 40,0 млн м<sup>3</sup>/год подземных вод, среди которых карьерные воды составляют 21,0...22,0 млн м<sup>3</sup>/год и 17,0...18,0 млн м<sup>3</sup>/год – высокоминерализованные шахтные воды. На уровне 1970-х гг. прошлого столетия в бассейне откачивалось до 60 млн м<sup>3</sup>/год подземных вод. До 1970 года все шахтные и карьерные воды горнодобывающих предприятий Кривбасса сбрасывались в реки Ингулец и Саксагань. Средняя минерализация шахтных и карьерных вод в это время не превышала 5 г/л при 10...12 г/л по отдельным шахтам. В настоящее время наблюдается резкое ухудшение качества подземных и поверхностных вод вызвано активной деятельностью горнорудных предприятий. Из Карачуневского водохранилища тратится примерно 70,2 млн м<sup>3</sup> пресной воды на промывку русла реки Ингулец, в которую происходит сброс шахтных вод. Но такие мероприятия малоэффективны, потому что промывная вода водохранилища за содержанием сульфатов относится к слабо солоноватым водам.

Особая экологическая проблема – это накопление шахтных вод в прудах - отстойниках, созданных на различных балках. В 2010 году средняя минерализация шахтных и стоковых вод в хвостохранилище шахты «Гвардейская»

составила – 3 г/дм<sup>3</sup>, в пруде-накопителе балки Свистунова – 38,4 г/дм<sup>3</sup> (рис. 1). Минерализация воды в реке Ингулец ниже Кривого Рога составляет 2,0...3,5 г/дм<sup>3</sup>, достигая 9...10 г/дм<sup>3</sup> во время сбросов шахтных вод из хвостохранилищ и прудов-накопителей. Вследствие этого под угрозой очутилось водоснабжение г. Николаева, продолжается засоление орошаемых земель Днепропетровской, Херсонской и Николаевской областей (сейчас стали почти непригодные к использованию порядка 59,5 тыс. гектаров орошаемых земель). Из прудов-накопителей и хвостохранилищ происходит фильтрация стоков в подземные водоносные горизонты, вызывая интенсивное их загрязнение. В настоящий момент общий объем дренажа вод из прудов-отстойников, шламохранилищ горнообогатительных комбинатов оценивается примерно в 14...20 млн м<sup>3</sup>/год. Ввиду отсутствия других емкостей, пригодных для аккумуляции шахтных вод, возникла необходимость срочного поиска альтернативных, экологически безопасных вариантов обращения с избытками этих вод. В соответствии с поручением Совета Министров Украинской ССР от 20.11.84 г. № 9006/82, в 1986 г. Кривбаспроект приступил к выполнению технико-экономического расчета (ТЭР) отвода шахтных вод Кривбасса. В этом ТЭР рассматривались, в частности, такие варианты отвода шахтных вод:

– вариант I – отвод шахтных вод в Черное море;

– вариант II – отвод шахтных вод в пруд-накопитель Запорожского железорудного комбината, расположенного в Утлюкском лимане Азовского моря;

– вариант III – захоронение шахтных вод в геологические структуры;

– вариант IV – опреснение шахтных вод и их утилизация;

В настоящее время как наиболее перспективный и экономически выгодный рассматривается вариант сброса шахтных вод в акваторию Черного моря. Однако экологическое обоснование такого сброса - отсутствует. Такое обоснование основывается на прогнозе уровня загрязнения акватории моря при сбросе шахтных вод.

**Целью данной работы** является проведение физического эксперимента по оценке влияния перепада плотности между сбрасываемыми шахтными водами и морской средой на характер формирования ближней (т.е. прилегающей к сбросному отверстию трубы) зоны загрязнения в акватории моря. В качестве места сброса выбрана, предложенная в ТЭР, акватория Черного моря вблизи пос. Железный Порт (Херсонская обл., рис. 2).



Рис. 1. Концентрация сульфатов в различные годы в пруде-отстойнике на б. Свистунова (последний столбец – величина ПДК)



Рис. 2. Схема размещения водовода, по которому планируется отвод шахтных вод из Криворожского района для их сброса в Черное море возле пос. Железный Порт

### Описание экспериментальной установки и методики моделирования

Сброс шахтных вод в акваторию моря будет реализован через сбросную трубу, размещен-

ную на расстоянии порядка 5 км от берега. Схематично это показано на рис. 3. В море, на определенной глубине, будет размещена сбросная труба. Расход шахтных вод через трубу, режим сброса, диаметр трубы – известны.

Физическое моделирование процесса сброса минерализованных шахтных вод в море проводилось в гидравлическом лотке (ширина лотка 13 см, длина – 1,7 м). Моделирование осуществлялось по числу Фруда и числу Архимеда [1, 2], т.е.

$$Fr = \frac{V^2}{gL} = idem ;$$

$$Ar = \frac{gL}{V^2} \cdot \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_1} = idem ,$$

где  $V$  – характерная скорость;  $\rho_1, \rho_2$  – плотность несущей среды и сбрасываемых сточных вод;  $L$  – характерный линейный размер.

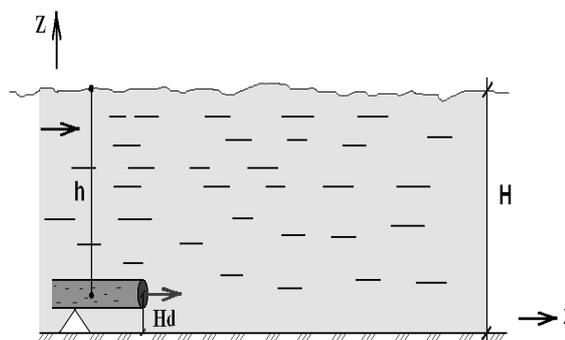


Рис. 3. Схема сброса шахтных вод в море

В качестве характерного линейного размера принят диаметр сбросной трубы  $d_n = 1$  м, а за характерную скорость принята скорость в сбросной трубе на выходе  $V_n = 1,2$  м/с.

Моделирование проводилось в масштабе 1:100, таким образом, диаметр сбросной трубы на модели составил  $d = 1$  см. Скорость в сбросной трубе на выходе, на модели, должна удовлетворять условию (согласно критерию Фруда)

$$V_M = \frac{V_H}{\sqrt{\alpha}} ;$$

где  $\alpha = \frac{L_H}{L_M}$  – линейный масштаб; индекс «Н» относится к параметрам природы, а индекс «М» – к модели.

Морская вода и шахтные воды имеют различную плотность. Поэтому при проведении физического эксперимента необходимо учесть данную особенность. Этот учет осуществляется путем обеспечения равенства числа Архимеда для модели и природы. Для обеспечения выпол-

нения критерия Архимеда минерализация «сбрасываемых» вод при проведении эксперимента составляла величину 21 г/л, поскольку вода, подаваемая в лоток, и моделирующая несущую среду – «море» бралась и системы питьевого водоснабжения. Для обеспечения заданного уровня минерализации в сбрасываемую в лоток воду (т.е. воду, которая моделировала шахтную) добавлялось соответствующее количество поваренной соли (отметим, что минерализация воды в Черном море составляет величину порядка 17...18 г/л, а сбрасываемых шахтных вод – 31...38 г/л).

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 4. В лотке 3 размещен ложемент 6, на котором располагается сбросная труба для подачи в поток минерализованных «шахтных» вод. Подача этих вод в сбросную трубу 7 осуществляется из бачка 8, где поддерживается постоянный уровень, для обеспечения в сбросной трубе заданной скорости истечения  $V_m$ . Для обеспечения спокойного состояния водного потока на участке сброса минерализованных вод, устанавливались два водослива – 4 и 5 (рис. 4). Подача воды в гидравлический поток 3 осуществлялась из резервуара 1. Для регулирования подачи использовался затвор 2. Фото гидравлического лотка показано на рис. 5.

Расход воды через лоток определяется объемным способом. Скорость потока  $V_m$  в сбросной трубе определялась с помощью трубки Пито. Глубина воды в лотке составляла 9,3 см. Вдоль лотка размещалась линейка для измерения длины зоны, где произойдет оседание струи сбросных вод, имеющих большую плотность. Для визуализации процесса рассеивания в сбрасываемые воды добавлялся краситель. Сброс вод в лоток фиксировался видеосъемкой.

### Результаты моделирования

Результаты экспериментальных исследований показаны на рис. 6 и рис. 7, где представлено фото зоны загрязнения водной среды в сходственные моменты времени ( $t = 10$  с) при истечении нейтральных сточных вод (рис. 6) (перепад плотности несущей среды и сбрасываемых вод равен нулю) и при сбросе минерализованных «шахтных» вод (рис. 7).

Хорошо видно, что при сбросе «нейтральных» вод, струя, вышедшая из сбросной трубы, движется прямолинейно и не имеет тенденцию к осаждению вниз. Отчетливо наблюдается тенденция расширения струи под действием

диффузии. Однако, при сбросе минерализованных вод (рис. 7) картина рассеивания – другая.

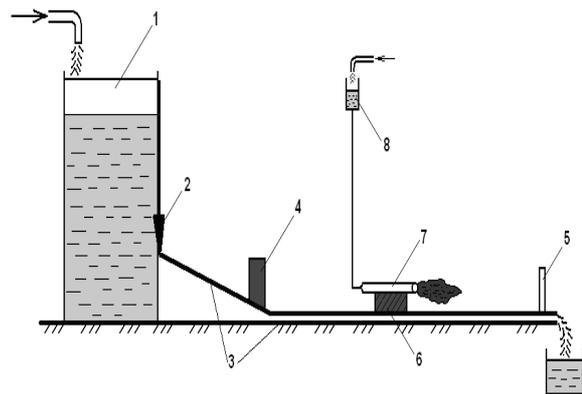


Рис. 4. Принципиальная схема расположения оборудования в гидравлическом лотке:  
1 – резервуар; 2 – затвор; 3 – лоток; 4 – водослив практического профиля; 5 – водослив с тонкой стенкой; 6 – ложемент; 7 – сбросная труба; 8 – бачок для подачи минерализованной воды



Рис. 5. Вид гидравлического лотка

Четко видно (рис. 7), что на расстоянии порядка 3 см от сбросного отверстия (в натуре, этому расстоянию соответствует длина участка 3 м) движение струи прямолинейное за счёт ее кинетической энергии. Но дальше имеет место хорошо выраженное движение загрязненной струи сбросных вод ко дну лотка и, начиная от сечения  $l \approx 4$  см, (в натуре,  $l \approx 4$  м) струя минерализованных вод движется вдоль дна. Вдоль дна располагается «ядро» шлейфа – наиболее концентрированная подзона загрязнения. Также видно, что вследствие турбулентной диффузии происходит размыв струи и частичное движение загрязнителя вверх.

При теоретическом расчете процесса рассеивания шахтных вод в акватории моря можно использовать полученный результат – применить метод «фиктивного источника» в математической модели. Это значит, что в математи-

ческой модели необходимо разместить источник сброса шахтных вод, сдвинутым на расстояние  $l$ , от реального положения выходного отверстия трубы.

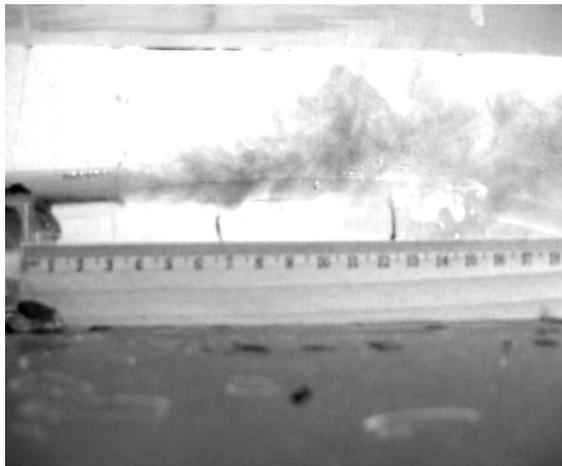


Рис. 6. Распространение загрязненной струи воды в лотке (нет перепада плотности между несущей средой и вторичным потоком)

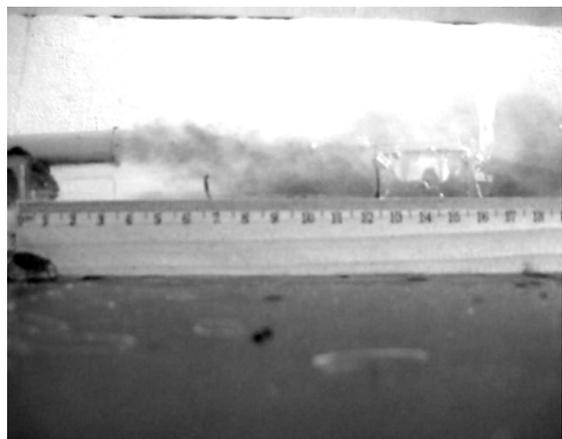


Рис. 7. Распространение загрязненной струи «шахтных» вод в лотке (есть перепад плотности между несущей средой и вторичным потоком)

## Выводы

В работе рассмотрена методика постановки и проведения физического эксперимента по моделированию рассеивания минерализованных шахтных вод в Черном море при их возможном сбросе туда в случае реализации проекта по утилизации высокоминерализованных вод Криворожского горнорудного бассейна. Моделирование проведено в гидравлическом лотке. В качестве критериев гидродинамического подобия использовались числа Фруда и Архимеда. Определена длина зоны, где произойдет оседание струи шахтных вод, вызванное перепадом плотности между несущей средой и вторичным потоком.

Дальнейшее совершенствование данного направления необходимо вести по созданию численной модели для расчета рассеивания шахтных вод в акватории моря.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник по гидравлике [Текст] / В. А. Большаков [и др.]. – К.: Вища шк., 1977. – 280 с.
2. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1978. – 735 с.

Поступила в редколлегию 16.05.2011.

Принята к печати 18.05.2011.