

Обобщенная формула для расчетов гидромеханических процессов водоочистки: осаждения, псевдооживления и фильтрации

Кравцов А.М.

Белорусский национальный технический университет

В настоящее время прогресс в области проектирования очистных сооружений все в большей мере зависит от качества методик расчетов. Это связано с тенденцией по замене экстенсивных технологий очистки на интенсивные с применением малогабаритных установок. Очевидно, расчеты и оптимизация таких установок могут быть выполнены, если известны общие закономерности хода гидромеханических процессов водоочистки.

До настоящего времени в проектных организациях при расчетах сооружений водоочистки используются рекомендации, изложенные в нормативных документах (например, в СНиП 2.04.02-84). Как правило, такие рекомендации имеют приближенный характер и не позволяют оптимизировать расчеты. Так для расчетов отстойников используются несовершенные методики, основанные на трех эмпирических формулах Стокса, Аллена-Блазиуса и Ньютона или на так называемой "Таблице гидравлической крупности". То же самое можно сказать и о рекомендациях для расчетов скорых зернистых фильтров.

Анализ состояния исследований процессов свободного и стесненного осаждения и взвешивания тел в жидкостях, псевдооживления зернистых слоев восходящим потоком воды, фильтрации однородных жидкостей в плотных зернистых средах, гидротранспорта зернистых материалов и т.д. показал, что за последние десятилетия в результате исследований ряда ученых получены обширные экспериментальные данные. Также предложено множество эмпирических расчетных формул, которые, однако, имеют свои недостатки и не выявляют общих закономерностей. В единой взаимосвязи эти процессы впервые стали рассматривать Д.М. Минц и С.А. Шуберт. В продолжение исследований в этом направлении другими учеными были получены общие формулы, которые, однако, являются громоздкими для практического применения и требуют более глубокого теоретического обоснования.

Все эти результаты послужили основой для проведения нами дальнейших исследований. При исследованиях процессов осаждения и взвешивания тел в жидкостях, псевдооживления зернистых слоев восходящим потоком воды и фильтрации жидкости в плотных зернистых средах ставилась задача не только получения очередной формулы для расчета того или иного процесса. Все указанные процессы рассматривались в единой взаимосвязи. В результате компьютерной обработки большого количества опытных данных и анализа существующих зависимостей с использованием положений теории подобия и анализа размерностей удалось получить новую формулу, конструкция которой позволяет производить расчеты исследованных процессов в широком диапазоне и с высокой точностью. Формула имеет безразмерный вид и включает критерии подобия, что помогает проследить влияние различных сил и лучше понять физическую природу явления. В общем случае формула имеет вид

$$\text{Re} = \frac{\frac{4}{3} \text{Kг} \varepsilon_1}{\frac{a}{\varepsilon_2} + b \sqrt{\frac{4}{3} \text{Kг}}}, \quad (1)$$

где: Re – критерий Рейнольдса; Kг – сложный критерий, учитывающий дополнительные силы, определяющие процесс; ε_1 и ε_2 – безразмерные параметры, характеризующие влияние формы тел и условий стеснения; a и b – постоянные коэффициенты.

В (1) Kг , ε_1 и ε_2 для различных случаев следующие:

свободное осаждение и взвешивание одиночных шаров

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1, \quad \text{Kг} = \frac{d_w^3 \Delta \rho \rho g}{\mu^2} = \text{Ar} - \text{критерий Архимеда};$$

стесненное осаждение и взвешивание одиночных шаров

$$\varepsilon_1 = \left(1 - \frac{d_w^2}{D^2}\right), \quad \varepsilon_2 = \left(1 - \frac{d_w}{D}\right)^2, \quad \text{Kг} = \frac{d_w^3 \Delta \rho \rho g}{\mu^2} = \text{Ar};$$

псевдооживление зернистых слоев и осаждение взвесей

$$\varepsilon_1 = \left(1 - \frac{3}{2} \beta c\right), \quad \varepsilon_2 = \left(1 - \sqrt{\frac{3}{2} \beta_0 c}\right)^2, \quad \text{Kг} = \frac{d_w^3 \rho^2 g \Delta \rho_c}{\mu^2 \rho_c} = \text{Ar};$$

фильтрация воды через плотную зернистую среду

$$\varepsilon_1 = \left(1 - \frac{3}{2} \beta c\right), \quad \varepsilon_2 = \left(1 - \sqrt{\frac{3}{2} \beta_0 c}\right)^2, \quad \text{Kг} = \frac{d_w^3 \rho^2 g I C}{\mu^2} = \text{Gal} C, \quad C = \frac{(1-c)}{c}, \quad \text{Gal} -$$

критерий Галилея, I – гидравлический уклон.

Поиск формулы (1) осуществлялся от наиболее простого случая свободного осаждения одиночных шаров в жидкости. С использованием положений теории подобия и анализа размерностей исходная зависимость, включающая пять размерных переменных ($v_{ш}$ – скорость установившегося движения шара, $d_{ш}$ – диаметр шара, ρ и μ – плотность и кинематический коэффициент вязкости жидкости, $G_{эф}$ – эффективный вес шара), была приведена к функциональной зависимости между критерием Рейнольдса Re и критерием Архимеда Ar . Это позволило упростить поиск аналитической зависимости, описывающей исследуемый процесс.

Анализ показал, что формула (1) для случая свободного осаждения одиночного шара в предельных случаях трансформируется в формулу Стокса (при $Ar \rightarrow 0$) и формулу Ньютона (при $Ar \rightarrow \infty$), что доказывает корректность полученной формулы и применимость ее в диапазоне действия этих формул.

При переходе к более сложным случаям выявлялось влияние различных условий на ход исследуемых процессов. Так условия стеснения учтены через отношение диаметров шара $d_{ш}$ и сосуда D в случае стесненного осаждения одиночных шаров, или через объемную концентрацию частиц c в случаях псевдооживления зернистых слоев и фильтрации жидкости в зернистых средах. При обтекании водой частиц произвольной формы появляются коэффициенты β и β_0 , характеризующие форму частиц диаметром d_c по отношению к форме эквивалентного шара.

В ходе исследований определены значения постоянных коэффициентов в формуле (1) для случаев свободного и стесненного осаждения шаров, псевдооживления зернистых слоев и фильтрации жидкости в зернистых средах, как для частиц естественных наносов (песок и гравий), так и частиц дробленых материалов (антрацит и керамзит). Сопоставления расчетных и опытных данных дали хорошие результаты. При этом относительные погрешности между расчетными и опытными значениями не превысили 5 %.