

*М.В. Игонина, С.В. Васькин*  
ФБОУ ВПО «ВГАВТ»

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В СУДОВОЙ СБОРНОЙ ЦИСТЕРНЕ СТОЧНЫХ ВОД С АЭРАЦИЕЙ

В настоящее время сотрудниками кафедры Теории корабля и экологической безопасности судов проводятся исследования в области увеличения автономности плавания речных судов по условиям экологической безопасности. Было установлено [1], что для большинства речных грузовых и буксирных судов увеличить автономность плавания можно путем создания условий для длительного хранения сточных вод (СВ) на борту судна. Наиболее приемлемым способом для этого может быть оборудование судна системой аэрации СВ.

Как было отмечено ранее [1], в «Наставлениях по предотвращению загрязнения внутренних водных путей при эксплуатации судов» (РД 152–011–00) предусматривалось увеличение времени хранения сточных вод на судах за счет обеспечения аэрации этих вод с определенной интенсивностью. Однако в указанных «Наставлениях...» отсутствовала методика определения других характеристик системы аэрации, связанных со временем безопасного хранения сточных вод на судне. Кроме того, указанный документ утратил силу в связи с распоряжением Минтранса РФ от 04.02.2011 г.

В работе [1] приведены модель такой системы и методика ее расчета с учетом влияния времени и интенсивности аэрации стоков в судовой сборной цистерне на срок безопасного хранения сточных вод на судах. Судовая цистерна СВ представляет собой непроточную емкость, объем жидкости в которой изменяется от минимального до максимального значения при ее постепенном заполнении. Объемный расход стоков, поступающих в цистерну, в общем случае непостоянен и является функцией времени. Концентрация примесей в сточной воде, попадающей в сборную емкость, также изменяется во времени. При аэрировании в цистерну через систему барботажных трубопроводов подается атмосферный воздух с объемным расходом  $L$ , насыщая воду кислородом и поддерживая протекание в ней реакций окисления.

Таким образом, в предложенной ранее модели судовой цистерны СВ с аэрацией рассматривается как известный в теории химической технологии непроточный реактор периодического действия (НРПД) со структурой потока в нем соответствующей модели идеального перемешивания. Однако в работе [1] не приводятся каких-либо теоретических или экспериментальных обоснований применения данной модели. В то же время известно, что гидродинамический характер структуры потока в аппаратах в значительной степени влияет на скорость процессов изменения его качественного состава.

Из литературы известно [2], что структура потока (т.е. режим движения жидкости) может существенно зависеть от интенсивности аэрации  $L$  и коэффициента продольного перемешивания  $D_L$ . А это, в свою очередь, определяет вид математической модели системы. Выяснению степени этого влияния и посвящена выполненная работа.

В теории химических реакторов известны два крайних случая модели аппарата: модель идеального вытеснения (МИВ) и модель идеального смешения (МИС). Первая модель предполагает полное отсутствие продольного перемешивания при движении потока в аппарате, а вторая – мгновенное равномерное распределение частиц по всему его объему. Реальные же модели работы реакторов, к которым можно отнести и судовую сборную цистерну СВ, значительно сложнее идеальных. Наличие перемешивания воды в сборной цистерне при помощи аэрации обуславливают невозможность использования модели МИВ для описания происходящих в ней процессов. Применимость же модели МИС в рассматриваемом случае может быть поставлена под сомне-

ние, поскольку интенсивность аэрации, а, следовательно, и перемешивания в цистерне в соответствии с рекомендациями авторов работы [3] может изменяться в достаточно широких пределах.

Для уточнения гидродинамической структуры потока в судовой сборной цистерне с аэрацией были рассмотрены более сложные модели аппаратов промежуточного типа – ячеечная и диффузионная.

Ячеечная модель схематически представляет собой реальный аппарат как некоторое число  $n$  одинаковых последовательно соединенных аппаратов идеального смешения. Варьируя количеством ячеек  $n$  можно получить модель идеального вытеснения (при  $n \rightarrow \infty$ ) или идеального смешения (при  $n = 1$ ).

Применяя данную модель к модели судовой системы аэрации СВ, можно увидеть, что для одной цистерны, т.е. при  $n = 1$  она принимает вид модели идеального смешения, и следовательно не может быть использована для создания модели судовой системы аэрации СВ.

Основой диффузионной модели является модель идеального вытеснения, осложненная обратным перемешиванием, наличие которого описывается формальным законом диффузии. Молекулярная и турбулентная диффузии, а также неравномерность поля скоростей в данной модели учитываются с помощью коэффициента продольной диффузии  $D_L$ .

Для диффузионной модели дифференциальная функция распределения времени пребывания имеет вид:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -w_{ж} \frac{\partial c}{\partial x} + D_L \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right), \quad (1)$$

где  $c$  – концентрация примесей в воде, мг/л;

$\tau$  – время пребывания воды в аппарате, с;

$w_{ж}$  – скорость движения воды в аппарате, м/с;

$x$  – текущая координата по длине аппарата, м;

$D_L$  – коэффициент продольной диффузии, учитывающий и молекулярную, и турбулентную диффузию, а также неравномерность поля скоростей.

При одном и том же значении  $D_L$  картина перемешивания может быть разной – на нее влияют также длина аппарата и скорость потока. Поэтому, чтобы распространить результаты на ряд подобных процессов, продольное перемешивание характеризуют критерием подобия Пекле:

$$Pe = \frac{w_{ж} L}{D_L}, \quad (2)$$

где  $L$  – размер аппарата вдоль направления потока, м.

При  $Pe = 0$  ( $D_L = \infty$ ) поток соответствует идеальному смешению. При  $Pe = \infty$  поток движется по схеме идеального вытеснения. Реальному же потоку соответствуют условия  $0 < Pe < \infty$ .

В случае судовой системы аэрации СВ аппарат состоит из одного непроточного реактора, в котором происходят сложные процессы перемешивания жидкости за счет постепенного наполнения аппарата и барботирования потока пузырьками воздуха. Существенное влияние на структуру потока оказывает коэффициент диффузии. Все эти процессы наиболее полно могут быть описаны диффузионной моделью.

При условии постоянства физических параметров (давления и температуры) основными влияющими факторами на коэффициент  $D_L$  являются [2] диаметр аппарата  $D$ , диаметр пузырьков  $d_0$ , скорость потока жидкости в аппарате  $w_{ж}$  и скорость газа  $w_г$ .

Для выяснения степени влияния этих факторов на диффузионные процессы в реальной судовой цистерне СВ был проведен расчет коэффициента  $D_L$  и число Пекле при различных параметрах аэрации для судовой цистерны СВ.

Согласно [2], расчет коэффициента продольной диффузии может быть произведен по формулам, полученным для реакторов с псевдооживленным слоем, в зависимости от соотношения скорости жидкости и критической скорости газа при аэрации:

$$\text{при } w_{жс} \leq w_{г.кр} (1 - \varphi)$$

$$D_L = Dw_{кр} + 1,67 Dw_0 \left( \frac{w_{г}}{w_0} \right)^{2/3}; \quad (3)$$

$$\text{при } w_{жс} > w_{г.кр} (1 - \varphi)$$

$$D_L = Dw_{кр} + 12,1D \frac{w_{кр}}{1 - \varphi} \left( \frac{w_{г}}{w_0} \right)^{2/3}, \quad (4)$$

где:  $\varphi$  – газосодержание слоя, принятое равным 5%;

$w_{г.кр}$  – критическая скорость газа, вычисляемая по формуле [2]:

$$w_{г.кр} = \frac{\pi w_0}{6} \left[ \frac{6d_0\sigma}{g(\rho_{жс} - \rho_{г})} \right]^{2/3}, \text{ см/с} \quad (5)$$

$w_0$  – скорость подъема единичного газового пузыря, м/с;

$d_0$  – диаметр пузырька воздуха, равный диаметру отверстий барботера, м;

$\sigma$  – межфазное натяжение, дин/см<sup>2</sup>;

$\rho_{жс}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{г}$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$D$  – диаметр или ширина цистерны, м;

$w_{г}$  – объемная скорость газа на полное сечение аппарата, м/с, численно равная интенсивности аэрации цистерны.

Для барботажного режима, в котором не происходит взаимодействия пузырей, их движение аналогично осаждению твердых сферических частиц [2]. Поэтому в расчетах были использованы известные формулы для вычисления скорости осаждения частиц в жидкости при разных гидродинамических режимах. Поскольку перемешивание в цистерне подразумевает турбулизацию потока, то вариант ламинарного режима был отсеян. Для переходной и турбулентной области в целях определения скорости осаждения идеальной сферической частицы были использованы формулы (6) и (7) соответственно.

Для переходного режима, при числах Рейнольдса  $2 < Re < 500$ :

$$w_0 = 0,78 \frac{d_0^{1,14} (\rho_{жс} - \rho_{г})^{0,715}}{\mu^{0,43} \cdot \rho_{жс}^{0,285}}, \text{ см/с}, \quad (6)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость воды, дин/с.

Для турбулентного режима ( $500 < Re < 2000$ ):

$$w_0 = 5,45 \sqrt{\frac{d_0 (\rho_{жс} - \rho_{г})}{\rho_{жс}}}, \text{ см/с} \quad (7)$$

При проведении расчетов были приняты размеры цистерны  $2 \times 2 \times 1,8$  м и скорость накопления СВ на судне  $1 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Диапазон варьирования интенсивности аэрации был принят согласно [3]:  $0,1 - 2,0 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Размеры пузырьков воздуха при аэрации приняты равными диаметрам отверстия перфорированной трубы [2], которые чаще всего составляют  $1 \dots 3$  мм.

Было произведено численное моделирование с помощью программы MS Excel влияния параметров аэрации и размера пузырьков на коэффициент продольного перемешивания. Выяснено, насколько велико влияние коэффициента  $D_L$  в судовой системе СВ и оценена возможность упрощения модели до МИВ или МИС.

Результаты моделирования представлены графически на рис.1 и 2.

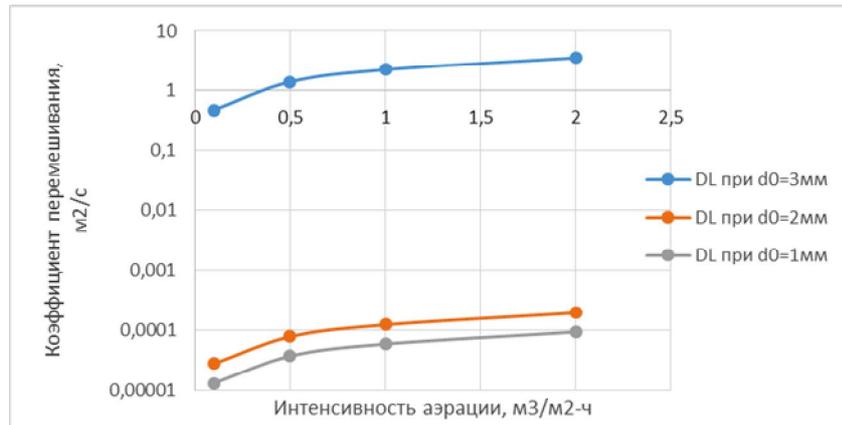


Рис. 1. Зависимость коэффициента продольного перемешивания от интенсивности аэрации при различных размерах пузырьков.

Как видно из рис. 1, коэффициент перемешивания практически не зависит от интенсивности аэрации в заданных пределах и более существенно зависит от диаметра пузырьков воздуха. Это влияние становится значимым при размерах пузырьков от  $3$  мм и более.

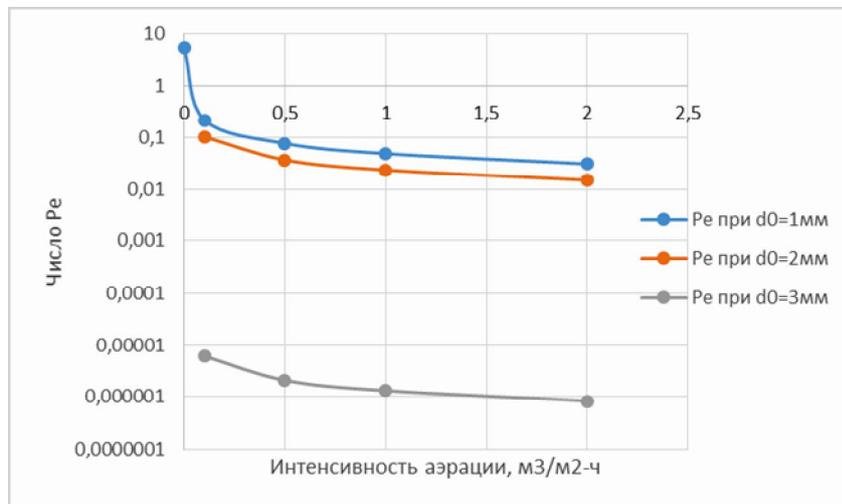


Рис. 2. Зависимость числа Пекле от интенсивности аэрации при разных размерах воздушных пузырьков.

Как видно из рисунка 2, число Пекле, характеризующее картину перемешивания в цистерне СВ, в меньшей степени зависит от интенсивности аэрации, и в большей от диаметра пузырьков. Причем, начиная с размера пузырька 3 мм и более значения числа Пекле резко снижаются, что говорит о приближении потока к модели идеального смешения.

Кроме того, расчеты показали, что:

1. На структуру потока существенное влияние оказывают интенсивность аэрации и размер газовых пузырьков.

2. При интенсивности аэрации в диапазоне от 0,1 до 2 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч) режим всплытия пузырьков турбулентный либо переходный. Числа Рейнольдса изменяются от  $Re = 171$  до  $Re = 891$ .

3. При этом низкие значения чисел Пекле (порядка от одной миллионной доли до десятых долей единицы) говорят о структуре потока близкой к идеальному смешению.

4. Размеры пузырьков воздуха существенно влияют на структуру потока начиная с 2...3 мм и более. Режим всплытия самих пузырьков воздуха может быть различным в зависимости от диаметра пузырька. При  $d_0 = 2$  мм и более режим турбулентный (числа  $Re$  – от 485 и более), при меньших диаметрах режим всплытия пузырьков переходный.

5. Для типовых цистерн СВ и скорости их наполнения структура потока может определяться только коэффициентом диффузии и практически не зависит от размеров цистерны и скорости движения воды в ней. А модель судовой системы СВ может быть отнесена к модели идеального смешения при условии барботирования цистерны пузырьками воздуха размером не менее 2 мм.

#### Список литературы:

- [1] Горин Н.Л. Повышение автономности плавания судов речного флота по условиям экологической безопасности / Горин Н.Л., Васькин С.В., Этин В.Л. // Речной транспорт (XXI век). 2011. – № 6(54). – С. 62–63
- [2] Кафаров В.В. Основы массопередачи. Учебное пособие для ВУЗов. – М.: Высшая школа, - 1972 г. – 496 с.
- [3] Горин Н.Л., Васькин С.В., Этин В.Л. Проектирование системы аэрации, обеспечивающей увеличение сроков хранения сточных вод в судовых сборных цистернах / Н.Л. Горин, С.В. Васькин, В.Л. Этин // Вестник ВГАВТ, №31, – Н.Новгород: ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2012. – С. 36–43.

**И.Б. Кочнева**  
ФБОУ ВПО «ВГАВТ»

## ПРИНЦИПЫ БЕЗОПАСНОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОЙ УТИЛИЗАЦИИ СУДНА ПО ГОНКОНГСКОЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНВЕНЦИИ

В мае 2009 г. в Гонконге прошла Дипломатическая конференция Международной морской организации (ИМО), на которой была принята Гонконгская международная конвенция по безопасной и экологически рациональной утилизации судов (далее Конвенция). Основная цель которой заключается в том, чтобы обеспечить экологически чистую разделку судов после окончания срока их службы и исключить риск здоровью персонала при разделке, учитывая при этом интересы безопасности судна, охраны окружающей среды и потребностей международной торговли.