

УДК 621.929  
DOI 10.35776/VST.2023.07.06



### Исследование оптимального режима взмучивания осадка в приемном резервуаре канализационной насосной станции

А. Н. Григорьева\*

\* Григорьева Анастасия Николаевна, кандидат технических наук,  
генеральный директор ГК «Элма-Астерион»  
195197, Россия, Санкт-Петербург, проспект Просвещения, 85,  
тел.: +7 (812) 490-75-03, e-mail: an@td-elma.ru

**Для цитирования:** Григорьева А. Н. Исследование оптимального режима взмучивания осадка в приемном резервуаре канализационной насосной станции // Водоснабжение и санитарная техника. 2023. № 7. С. 53–59. DOI: 10.35776/VST.2023.07.06.

Взмучивание осадка в приемном резервуаре канализационной насосной станции является достаточно серьезной проблемой из-за большого риска выхода из строя насосного оборудования, а также слеживания и загнивания осадка в самом резервуаре. Как правило, методы борьбы с оседанием осадка направлены на освобождение только области вблизи всасывающих патрубков насосов. В остальной же части резервуара слежавшийся осадок периодически вымывают вручную в периоды технического обслуживания или минимального заполнения. Приводится сравнение двух методов взмучивания осадка в приемном резервуаре канализационной насосной станции. В первом случае осадок взмучивает-

ся гидравлическим способом – с помощью трубопроводов, расположенных по периметру емкости. Во втором используются конические мешалки усовершенствованной геометрии, то есть взмучивание осадка осуществляется механическим способом. Сравнение эффективности перемешивания производилось при помощи CFD-моделирования. Согласно результатам моделирования гидродинамики перемешивания, при работе конических мешалок практически не образуются застойные зоны в придонной области перемешивания.

**Ключевые слова:** очистные сооружения, насосная станция, взмучивание осадка, конические мешалки, математическое моделирование.

## SURFACE RUNOFF TREATMENT

### Study of the optimal mode of sludge agitation in the receiving tank of a wastewater pumping station

A. N. Grigor'eva\*

\* Grigor'eva Anastasiia, Ph. D. (Engineering), General Director, Elma-Asterion Group  
85 Prosveshcheniia Ave., Saint-Petersburg, 195197, Russian Federation, tel.: +7 (812) 490-75-03, e-mail: an@td-elma.ru

**For citation:** Grigor'eva A. N. Study of the optimal mode of sludge agitation in the receiving tank of a wastewater pumping station. *Vodospabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2023, no. 7, pp. 53–59. DOI: 10.35776/VST.2023.07.06. (In Russian).

Sludge agitation in the receiving tank of a wastewater pumping station is a rather serious problem due to the high risks of the pumping equipment failure, sludge caking and decay inside the tank. As a rule, sludge settling control methods provide for emptying only the area close to the suction nozzles of the pumps. In the rest of the tank, the caked sludge is periodically washed out by hand during maintenance or minimum filling. A comparison is made between two methods of sludge agitation in the receiving tank of a wastewater pumping station. In the first case, sludge is agitated hydraulically, i. e., using pipelines located along the perimeter of the tank. In the second, conical mixers of improved geometry are used, that is, sludge is agitated mechanically. A comparison of mixing efficiency was made using CFD-modeling. According to the results of modeling the hydrodynamics of mixing, during the operation of conical mixers, no stagnant zones is actually formed in the near-bottom mixing area.

**Key words:** treatment facilities, pumping station, conical mixers, sludge agitation, mathematical modeling.

### Введение

Одним из важнейших элементов водопроводно-канализационного хозяйства населенных пунктов являются канализационные насосные станции (КНС). Многие КНС находятся в непрерывной эксплуатации 40–50 лет и нуждаются в серьезной реконструкции. Типичное состояние таких насосных станций характеризуется изношенностью строительных конструкций, особенно в гребельных отделениях и приемных резервуарах, устаревшим оборудованием (насосы, решетки, арматура), низким КПД насосов, отсутствием современных систем автоматизации и контроля технологического процесса, что вынуждает круглосуточно обеспечивать присутствие персонала [1]. Основные требования к компоновке насосных и воздуходувных станций, определению размеров машинных залов, к подъемно-транспортному оборудованию, размещению агрегатов, арматуры и трубопроводов, обслуживающих устройств (мостиков, площадок, лестниц и др.), а также к мероприятиям против затопления машинных залов изложены в СП 32.13330.2018 «СНиП 2.04.03-85 Канализация. Наружные сети и сооружения». Пункт 8.2.17 данного документа гласит: «В приемных резервуарах следует предусматривать устройства для взмучивания осадка и обмыва резервуара». Выбор и расчет подобных устройств подробно в нормативной документации не приводится.

Анализируя литературные данные, можно заключить, что для проектирования насосных станций хорошо освещены такие вопросы, как выбор насосного оборудования [2], гидравлические удары [3], очистка вентиляционных выбросов от дурнопахнущих веществ [1; 4], автоматизация комплекса канализационных насосных станций [5; 6]. Очевидно, что гидравлические условия в резервуаре тесно связаны с его объемом. При малых размерах существует высокий риск гидравлических проблем, но при этом седиментация осадка практически исключена. Таким образом, системы взмучивания осадка актуальны только в аккумулирующих резервуарах большого объема.

По мнению авторов пособия по проектированию канализационных насосных станций компании *KSB*, проблемы с остающимися грязевыми отложениями, твердым веществом или осадком, по опыту последних лет во всем мире, возникают максимум у 3% насосных станций. Однако российские авторы [7] отмечают: «Опыт эксплуатации систем канализации населенных пунктов показывает достаточно низкую культуру населения при пользовании системой централизо-

ванного водоотведения. В систему канализации могут поступать бытовые отбросы различного характера, задерживаемые и не задерживаемые решетками в приемных отделениях насосных станций. Перекачиваемые затем со сточными водами насосными агрегатами на очистные сооружения они со временем «заиливают» сооружения, эффективность работы которых постепенно снижается». Заиливание насосных станций наблюдается и в г. Кедровый Томской области [7].

Следовательно, взмучивание осадка является достаточно серьезной проблемой и в настоящее время не описано в литературе. Есть несколько путей решения данной проблемы:

1) монтаж перфорированных труб или опусков труб по периметру приемного резервуара;

2) установка погружных горизонтальных перемешивающих устройств;

3) установка в приемном резервуаре погружных насосов со взмучивающей головкой.

Самое простое взмучивающее устройство – это взмучивающий трубопровод, который монтируется из напорной сети выше задвижки. На нем также должна быть установлена задвижка, позволяющая при необходимости направлять вниз часть стока для взмучивания осадка. Однако размыть агломерировавшийся, спрессованный во времени осадок не всегда возможно. Данная операция связана с высокими энергетическими затратами. Поэтому наилучшим решением является отсутствие осадка в принципе, для чего внутрь резервуара устанавливаются перемешивающие устройства для предотвращения оседания твердых частиц на дно.

При проектировании КНС для очистки стока с большим объемом взвеси (песка) предусматривают погружные мешалки. Но при формировании объемно-планировочного решения станции следует учитывать, что мешалка требует много пространства, поэтому размер корпуса увеличится.

В паре с насосом может идти взмучивающий клапан, который препятствует накоплению осадка на дне и убирает осаждаемые вещества вместе с перекачиваемой средой.

Несмотря на то, что в современной литературе имеются статьи, посвященные изучению траектории и места наиболее вероятного отложения осадка [8], при этом недостаточно освещен вопрос выбора оптимального метода взмучивания осадка без возникновения застойных зон. Все вышеперечисленные методы имеют недостатки.

Целью настоящей статьи является определение оптимального режима взмучивания осадка, сравнительный анализ гидравлического и механического перемешивания с помощью кони-

ческих мешалок нового типа [9] посредством метода вычислительной гидродинамики (CFD). Математическое моделирование процесса взмучивания осадка выполнено на примере приемного резервуара грязного дождевого стока.

Стоит сразу отметить, что установка систем взмучивания осадка необходима только в том случае, если отложений не так много и они не приводят к выходу из строя насосов.

Авторы статьи [10] указывают, что в случае, когда концентрация песка превышала допустимую для основных насосов, это приводило к быстрому износу рабочего колеса и внутренних полостей насосного агрегата, а также к истиранию напорного трубопровода. Для решения обозначенной проблемы была предложена направляющая перегородка внутри резервуара, а также размещение пескового насоса, перехватывающего поток пескопульпы при движении воды к основным насосам.

### Теоретическая часть

Переход твердого вещества во взвешенное состояние в аппарате с мешалкой в основном зависит от величины аксиальной составляющей вектора скорости потока, создаваемого мешалкой. Следовательно, процесс суспендирования возможен только в условиях, когда аксиальная составляющая скорости потока жидкости ( $w_o$ ) больше или равна скорости осаждения твердой фазы ( $w_{oc}$ ). Величина аксиальной составляющей скорости зависит от частоты вращения мешалки. Таким образом, основной проблемой при расчете аппаратов с перемешивающими устройствами является определение минимально необходимой частоты вращения для поднятия осадка со дна.

В практике перемешивания различают различные режимы суспендирования твердых включений в жидкости [11]:

1) создание скорости потока, при которой твердые включения движутся вдоль дна, оседая на поверхность не более чем на 2 секунды (рис. 1, а);

2) суспендирование в придонной области, когда твердые частицы сосредоточены в нижней части емкости, но не оседают на дно (рис. 1, б);

3) создание равномерной концентрации (причем равномерное распределение является приближенным [12]) суспензии по всей высоте аппарата (рис. 1, в).

Перемешивание в режиме, когда твердые частицы сосредоточены в нижней части емкости, но не оседают на дно (рис. 1, б), позволит существенно сэкономить энергию по сравнению с режимом перемешивания, при котором происходит распределение по всей высоте аппарата (рис. 1, в).

При выборе перемешивающего устройства для суспендирования следует акцентировать внимание на форму мешалки, которая создает преимущественно радиальный (направленный вдоль дна) или осевой (направленный вдоль вала мешалки) поток. Поскольку вертикальная составляющая средней скорости вблизи днища обращается в ноль, источником возникновения подъемной силы может служить только горизонтальная составляющая скорости или турбулентные пульсации вблизи днища [12].

В случае, когда для суспендирования используется мешалка, создающая преимущественно осевой поток, внутри реактора может дополнительно устанавливаться центральная направляющая труба, предназначенная для усиления осевого циркуляционного контура [13].

В современной литературе скорость вращения мешалки, необходимая для подъема осадка со дна, обозначается как  $n_{js}$  – *just suspend speed*. Многочисленные исследования на эту тему провел Цвитеринг [14].

В 2014 г. в статье Айранчи и Кресты [15] теория Цвитеринга была дополнена. Для расчета критической частоты вращения мешалки  $n_{js}$  была разработана новая формула:

$$n_{js} = A \left( \frac{g(\rho_{тв} - \rho_{ж})}{\rho_{ж}} \right)^{0,5} \cdot \frac{d_{ч}^{1/6} x^n}{k_N^{1/3} d_M^{2/3}} \cdot \frac{D}{d_M}, \quad (1)$$

где  $A$  – константа, зависящая от геометрии мешалки;  $\rho_{тв}$  и  $\rho_{ж}$  – плотность твердой и жидкой фаз соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $d_M$  – диаметр мешалки, м;  $x$  – массовая концентрация твердой фазы;  $n$  –

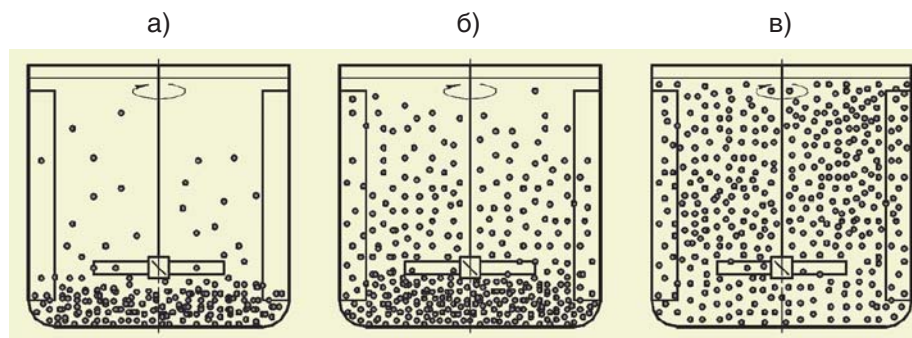


Рис. 1. Различные режимы суспендирования частиц в аппарате [13]  
а – движение частиц вдоль дна; б – суспендирование в придонной области; в – распределение по всей высоте

коэффициент ( $n = 0,23$ );  $D$  – диаметр емкости, м;  $k_N$  – коэффициент мощности мешалки.

После определения необходимой частоты вращения мешалки можно рассчитать мощность  $N$ , расходуемую на перемешивание, по формуле [13]:

$$N = k_N \rho_c n_{js}^3 d_M^5, \quad (2)$$

где  $\rho_c$  – плотность суспензии, кг/м<sup>3</sup>.

Методы вычислительной гидродинамики (CFD) позволяют более наглядно сравнивать эффективность работы мешалок различной геометрии. CFD решает фундаментальные уравнения потока, которые описывают, каким образом физические законы управляют движением жидкости.

Модуль вычислительной гидродинамики входит в состав пакета Comsol Multiphysics, который был выбран в качестве программной среды в настоящем исследовании. Одним из ключевых преимуществ данного пакета является мультифизика – возможность решения связанных междисциплинарных задач в единой среде.

### Моделирование процесса перемешивания в приемном резервуаре грязного дождевого стока

**Исходные данные для моделирования.** Отделение грязного стока представляет собой прямоугольный высокий резервуар. Рабочая среда (дождевые стоки) подается в емкость в виде падающей струи из распределительного канала после прохождения решетки. Из камеры среда откачивается через три всасывающих трубопровода (рис. 2). Дно камеры имеет уклон в сторону всасывающих трубопроводов.

Геометрические размеры емкости: 12000×10500×9560 мм (длина, ширина, высота), высота заполнения 5000 мм.

В качестве одного из вариантов взмучивания осадка в резервуаре установлены две конические мешалки производства ООО «Астерион» (рис. 2, а). Параметры конических мешалок: диаметр 2000 мм, частота вращения 40 об/мин, мощность привода 5,5 кВт.

В противовес этому также рассматривается тради-

ционный вариант установки трубопроводов взмучивания, на конце которых расположены распределители с пятью выходами (рис. 2, б).

Объемная модель строилась в программной среде КОМПАС 3D, далее экспортировалась в предпроцессор программы Comsol Multiphysics для последующего построения расчетной модели процесса перемешивания (рис. 3).

**Построение расчетной модели в программе Comsol Multiphysics.** Расчетная модель – перемешивание однофазной жидкости в турбулентном режиме ( $k$ - $\varepsilon$ -модель). Сегодня  $k$ - $\varepsilon$ -модель является стандартной для описания турбулентности и решения инженерных задач. В данной модели вводятся два важных понятия: турбулентная энергия  $P$  и диссипация  $\varepsilon$ . Физический смысл турбулентной энергии  $P$  заключается в порождении новых вихрей и пульсаций, интенсивность которых и характеризует уровень турбулентности. Диссипация  $\varepsilon$ , напротив, представляет собой рассеивание больших вихрей на более малые, приводящее к усреднению течения и снижению турбулентности.

В случае расчета резервуара с мешалками наличие вращающего элемента модели учитывается при помощи модуля *Frozen Rotor*. Этот модуль

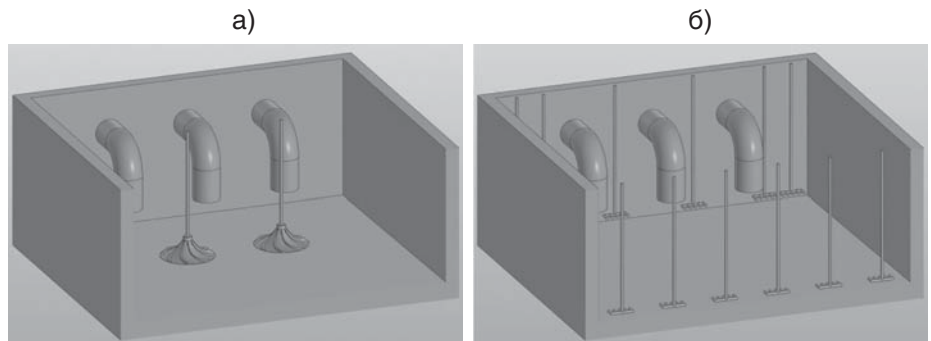


Рис. 2. 3D-модель рабочего объема резервуара грязного стока  
а – с коническими мешалками; б – с установленными вдоль противоположных стен трубопроводами взмучивания

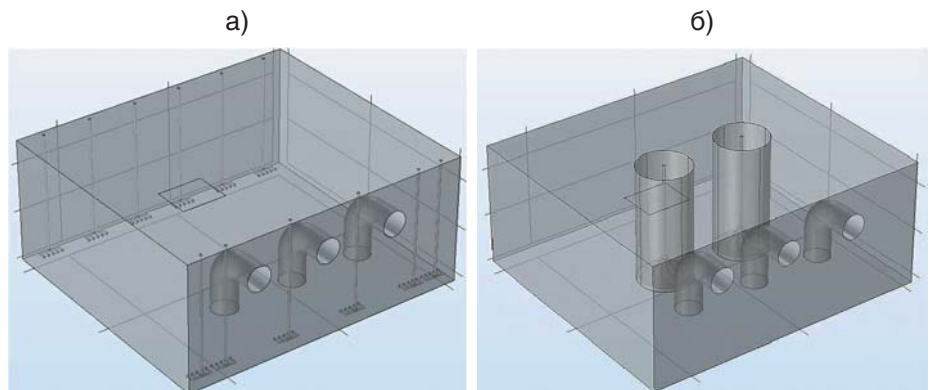


Рис. 3. 3D-модель рабочего объема резервуара грязного стока, экспортированная в предпроцессор программы Comsol Multiphysics  
а – с трубопроводами взмучивания; б – с коническими мешалками с выделенными вращающимися доменами

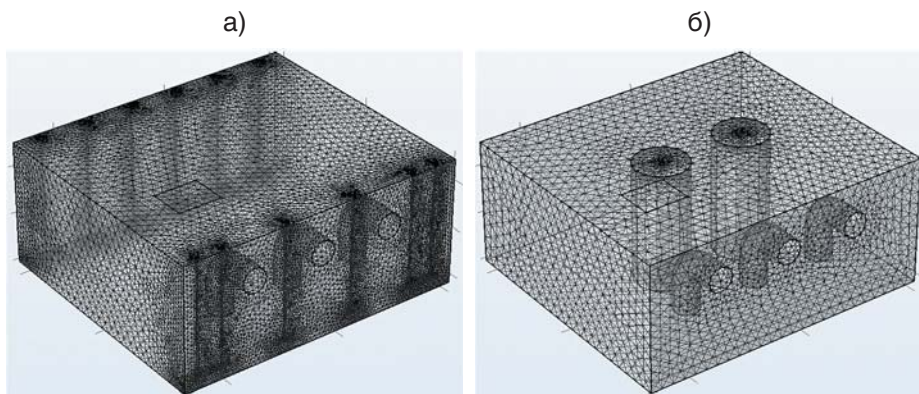


Рис. 4. Разбиение расчетной области резервуара на расчетные элементы а – с трубопроводами взмучивания; б – с коническими мешалками

используется для вычисления скорости, давления, турбулентности, концентрации, температуры и других полей для потока при наличии в нем вращающихся элементов модели и является частным случаем стационарного исследования. Вращающиеся части удерживаются в неподвижном положении, а вращение учитывается включением центробежных сил и сил Кориолиса.

В качестве начальных и граничных условий задавались размеры стенок резервуара (с условием прилипания), параметры рабочей среды (плотность, вязкость, температура), направление действия силы тяжести, вход и выход рабочей среды с учетом объемного расхода  $730 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Скорость жидкости на выходе из концов распределителей трубопроводов взмучивания предусматривалась  $1,55 \text{ м/с}$ .

Расчетная сетка строилась при помощи встроенного модуля разбиения расчетной области (рис. 4). Очень важным критерием при численном расчете той или иной задачи является сеточная сходимость, т. е. независимость решения от шага сетки. Для этого качество расчетной сетки должно быть достаточным, чтобы обеспечить точность решений. Важно принимать во внимание доступные вычислительные ресурсы, поэтому шаг сетки должен быть оптимальным, не слишком мелким.

Границы допустимых размеров указывались вручную для каждого из доменов. Для вращающихся доменов и доменов трубопроводов взмучивания применялась более мелкая сетка с минимальным размером ячейки  $5 \text{ мм}$ , для домена резервуара – сетка с минимальным размером ячейки  $50 \text{ мм}$ .

#### Результаты моделирования процесса перемешивания в приемном резервуаре

**Перемешивание при помощи трубопроводов взмучивания.** Согласно результатам моделирования, при работе только трубопроводов взмучи-

вания достаточно крупные застойные зоны образуются между трубопроводами и за ними (области 1 и 2), так как сфокусированный поток от распределителей направлен в сторону центра резервуара (рис. 5). Также наблюдаются области пониженных скоростей в местах «столкновения» разнонаправленных потоков распределителей по линии центра резервуара (область 3). Само распределение скоростей также не является симметричным из-за наклонного дна резервуара.

Перемешивание при помощи конических мешалок. Согласно результатам моделирования, при работе мешалок Микс GMS в придонной части перемешивания области низких скоростей образуются в местах «столкновения» разнонаправленных потоков от мешалок и потока от мешалки и боковой стенки (рис. 6), однако в этих местах придонный поток преобразуется в осевой (рис. 7 и 8).

**Выводы по результатам моделирования.** Оба варианта перемешивания не исключают образования застойных зон: при работе трубопроводов взмучивания застойные зоны образуются по причине того, что сфокусированный поток от распределителей направлен в сторону центра резервуара и не затрагивает области между трубопроводами и за ними; при работе мешалок Микс GMS небольшие застойные области образуются

влияния достаточно крупные застойные зоны образуются между трубопроводами и за ними (области 1 и 2), так как сфокусированный поток от распределителей направлен в сторону центра резервуара (рис. 5). Также наблюдаются области пониженных скоростей в местах «столкновения» разнонаправленных потоков распределителей по линии центра резервуара (область 3). Само распределение скоростей также не является симметричным из-за наклонного дна резервуара.

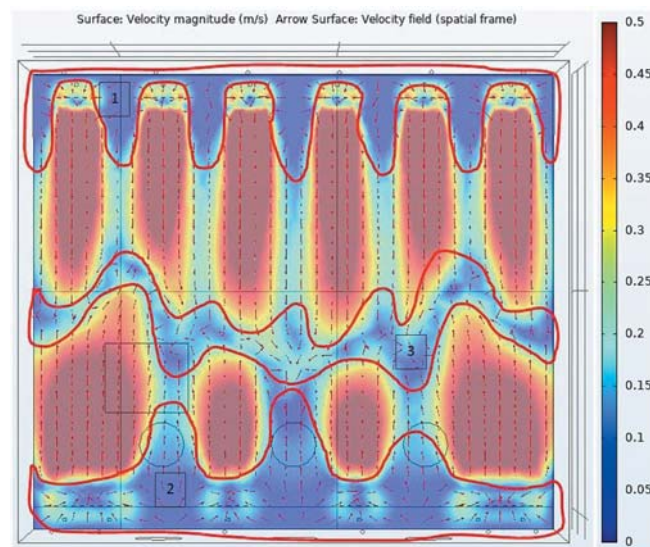


Рис. 5. Распределение поля модуля вектора скорости жидкости и векторное поле скорости жидкости на дне резервуара грязного стока с трубопроводами взмучивания 1–3 – застойные зоны

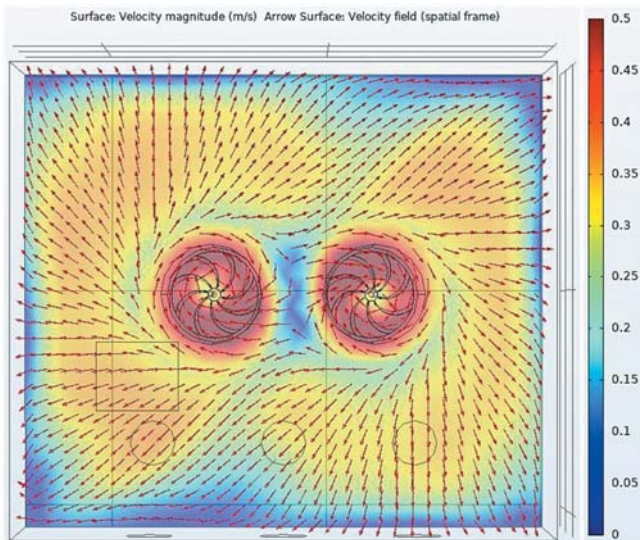


Рис. 6. Распределение поля модуля вектора скорости жидкости и векторное поле скорости жидкости на дне резервуара грязного стока с работающими мешалками Микс GMS

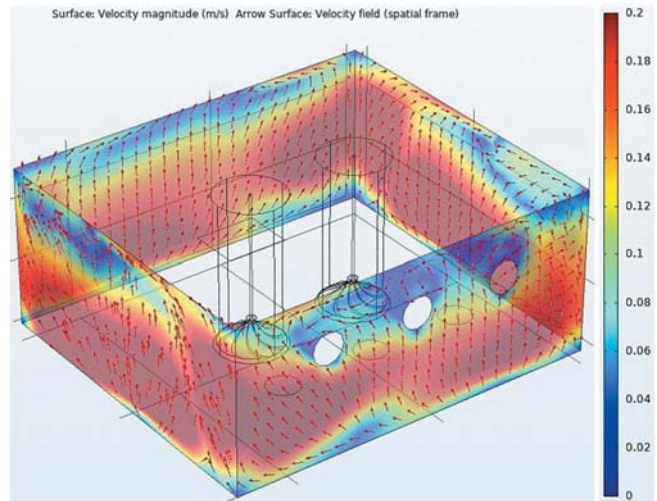


Рис. 8. Распределение поля модуля вектора скорости жидкости и векторное поле скорости жидкости на боковых стенках резервуара с работающими мешалками

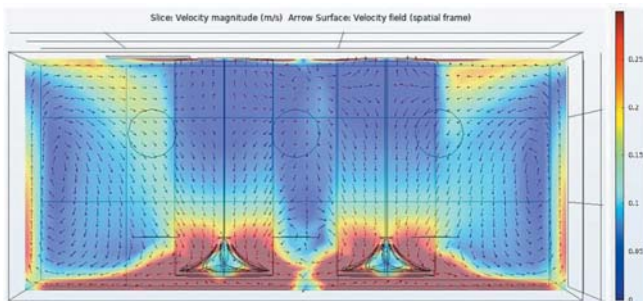


Рис. 7. Распределение поля модуля вектора скорости жидкости и векторное поле скорости жидкости в плоскости, нормальной ко дну резервуара и проходящей через ось мешалок Микс GMS

в углах резервуара, что можно исправить созданием скруглений.

Однако в случае работы мешалок застойные зоны в придонной части резервуара со скоростью менее 0,1 м/с практически отсутствуют (рис. 9).

Скорость осаждения содержащихся в дождевых стоках глиняных частиц размером 1 мм и плотностью 1500 кг/м<sup>3</sup> без учета стесненности составляет 84 мм/с. Таким образом, использование конических мешалок Микс GMS с заданной частотой вращения позволяет формировать большую область в придонной части аппарата, не допускающую осаждения твердой фракции размером 1 мм и плотностью 1500 кг/м<sup>3</sup> (с учетом запаса).

### Выводы

В работе проведен сравнительный анализ процесса перемешивания в приемном резервуаре грязного дождевого стока канализационной насосной станции с использованием трубопроводов взмучивания и конических мешалок при помощи CFD-моделирования. По результатам математического моделирования вариант с использова-

нием конических мешалок оказался более эффективным: обеспечивается более равномерное поле скорости в придонной части резервуара, а также практически полностью исключается образование застойных зон. Более эффективная работа конических мешалок достигается благодаря созданию преимущественно радиальной составляющей скорости вблизи дна резервуара, что способствует эффективному суспендированию осадка и обеспечению отсутствия залежей.

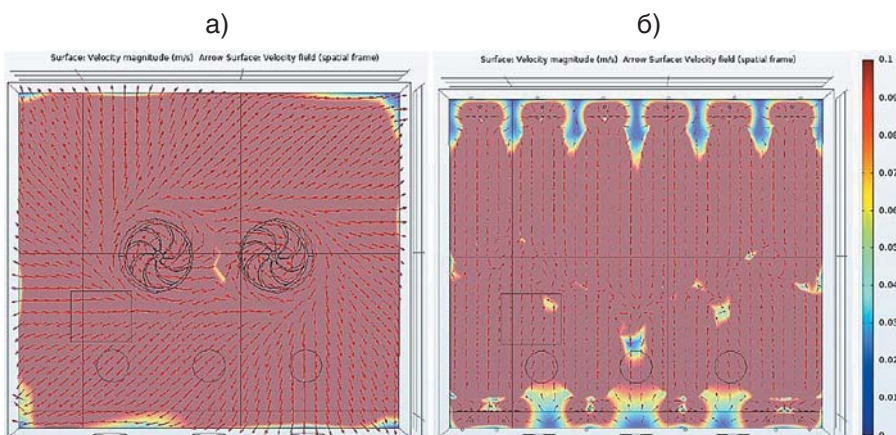


Рис. 9. Распределение поля модуля вектора скорости жидкости и векторное поле скорости жидкости на дне резервуара грязного стока а – с работающими коническими мешалками; б – при работе трубопроводов взмучивания

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пшенко Л. Н. Реконструкция действующих канализационных насосных станций: практический опыт // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. 2015. № 3–4. С. 42–46.
2. Николаев В. Г. Влияние характеристик насосов на энергопотребление канализационных насосных станций и качество очистки сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2009. № 10, часть 2. С. 3–10.
3. Игнатчик В. С., Коновалов В. Б., Винокуров П. В. Методика пусконаладочных работ устройств гашения гидравлических ударов на канализационных насосных станциях // Военный инженер. 2021. № 2 (20). С. 30–37.
4. Хуррамова Н. У. Существующие способы очистки выбросов канализационной насосной станции // Инновации. Наука. Образование. 2022. № 70. С. 56–59.
5. Крюков О. В. Электрооборудование и автоматизация комплекса канализационных насосных станций // Автоматизация в промышленности. 2011. № 12. С. 31–34.
6. Вишняков В. Н. Применение автоматизированного управления канализационными насосными станциями как средство повышения надежности их эксплуатации // Наука XXI века. 2019. № 6. С. 1–10.
7. Дзюбо В. В., Алферова Л. И. К вопросу о реконструкции канализационных очистных сооружений г. Кедровый в Томской области // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 2 (21). С. 188–198.
8. Urishev B., Kuvatov U., Artikbekova F., Kuvatov D. Trajectory of sediment deposition at the bottom of water intake structures of pumping stations. *Materials Science and Engineering*, 2021, no. 1030, p. 1–9.
9. Пат. 2683078, РФ. МПК B01F7/18 B01F7/26. Перемешивающее устройство / Абиев Р. Ш. // Изобретения. Полезные модели. 2018. № 60.
10. Федоров С. В., Столбихин Ю. В., Шабалин В. В. Предотвращение заиливания осадком ливневой насосной станции // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 5. С. 72–78.
11. Lin F. Y., Shao S. EKATO Handbook of mixing technology. *Schopfheim*, 1991, v. 143, pp. 231–240.
12. Брагинский Л. Н., Бегачев В. И., Барабаш В. М. Перемешивание в жидких средах. – Л.: Химия, 1984. 336 с.
13. Edward L. Paul, Victor A. Atiemo-Obeng, Suzanne M. Kresta. Handbook of industrial mixing: science and practice. Canada: A John Wiley & Sons, 2004, 1432 p.
14. Zwietering T. N. Suspending of solid particles in liquid by agitators. *Chemical Engineering Science*, 1958, no. 3–4, pp. 244–253.
15. Ayranci In., Kresta S. M. Critical analysis of Zwietering correlation for solids suspension in stirred tanks. *Chemical Engineering Research and Design*, 2014, no. 92, pp. 413–422.

REFERENCES

1. Pshenko L. N. [Upgrade of the operating wastewater pumping stations: practical experience]. *Nailuchshchie Dostupnye Tekhnologii Vodostabzheniia i Vodootvedeniia*, 2015, no. 3–4, pp. 42–46. (In Russian).
2. Nikolaev V. G. [The effect of pump characteristics on the energy consumption of wastewater pumping stations and effluent quality]. *Vodostabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2009, no. 10, part 2, pp. 3–10. (In Russian).
3. Ignatchik V. S., Konovalov V. B., Vinokurov P. V. [Methods for commissioning of devices for damping surges at wastewater pumping stations]. *Voennyi Inzhener*, 2021, no. 2 (20), pp. 30–37. In Russian).
4. Khurramova N. U. [Current methods of cleaning emission of a wastewater pumping station]. *Nauka. Innovatsii. Obrazovanie*, 2022, no. 70, pp. 56–59. (In Russian).
5. Kriukov O. V. [Electrical equipment and automation of a group of wastewater pumping stations]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2011, no. 12, pp. 31–34. (In Russian).
6. Vishniakov V. N. [The use of automated control of wastewater pumping stations as a means of increasing the reliability of their operation]. *Nauka XXI Veka*, 2019, no. 6, pp. 1–10. (In Russian).
7. Dziubo V. V., Alferova L. I. [On the of reconstruction of wastewater treatment facilities in Kedrovyi town in the Tomsk region]. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Arkhitekturno-Stroitel'nogo Universiteta*, 2010, no. 2 (21), pp. 188–198. (In Russian).
8. Urishev B., Kuvatov U., Artikbekova F., Kuvatov D. Trajectory of sediment deposition at the bottom of water intake structures of pumping stations. *Materials Science and Engineering*, 2021, no. 1030, pp. 1–9.
9. Abiev R. Sh. [Pat. 2683078, RF. IPC B01F7/18 B01F7/26. Agitation device. *Izobreteniia. Poleznye Modeli*, 2018, no. 60]. (In Russian).
10. Fedorov S. V., Stolbikhin Iu. V., Shabalin V. V. [Prevention of sludge settling at a stormwater pumping station]. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo*, 2022, no. 5, pp. 72–78. (In Russian).
11. Lin F. Y., Shao S. EKATO Handbook of mixing technology. *Schopfheim*, 1991, v. 143, pp. 231–240.
12. Braginskii L. N., Begachev V. I., Barabash V. M. *Peremeshivanie v zhidkikh sredakh* [Mixing in liquid media. Leningrad, Khimiia Publ., 1984, 336 p.].
13. Edward L. Paul, Victor A. Atiemo-Obeng, Suzanne M. Kresta. Handbook of industrial mixing: science and practice. Canada: A John Wiley & Sons, 2004, 1432 p.
14. Zwietering T. N. Suspending of solid particles in liquid by agitators. *Chemical Engineering Science*, 1958, no. 3–4, pp. 244–253.
15. Ayranci In., Kresta S. M. Critical analysis of Zwietering correlation for solids suspension in stirred tanks. *Chemical Engineering Research and Design*, 2014, no. 92, pp. 413–422.