

## Погружные мешалки, как перспективное направление научно-исследовательских работ

# 07, июль 2015

Баженов В. И.<sup>1,\*</sup>, Божьева С. М.<sup>1</sup>

УДК: 628.3:62-137

<sup>1</sup>Россия, ЗАО «Водоснабжение и водоотведение»

<sup>\*</sup>[bazhenov@pump.ru](mailto:bazhenov@pump.ru)

### Введение

Наиболее близким аналогом конструктивного оформления мешалки с погружным двигателем защиты IP68 является погружная насосная техника. Это подтверждается фактом производства данного рода техники ведущими *насосными* производителями мира. В данном контексте роль научных исследований МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра Э10, представляется ведущей в РФ. Цель доклада: представить специалистам МГТУ им. Н.Э. Баумана аргументы в пользу научно-исследовательских разработок моноблочных мешалок с двигателями погружного типа.

### 1. Историческая справка

Искать изобретателя мешалки или процесса перемешивания – дело достаточно трудное, практически невыполнимое. В свое время к этому приложили руку многие известные нам ученые. Рассмотрим некоторые характерные этапы.

Архит Таренский, друг Платона (428 – 347 до н.э.), предложил математическое построение наклонных плоскостей в объеме цилиндра, подобных винтовым лопастям. Архимед (220 до н.э.) использовал прообраз винтовых насосов. Леонардо да Винчи начертил вертолет с вращающимся пропеллером. Роберт Гук (1680) предложил использовать лопасти ветряной мельницы для того, чтобы приводить воду в движение. Иоганн Бернулли (отец Даниила Бернулли, 1752) предложил оснастку лодок винтом в виде «лопатонок, установленных под углом 60° к оправке и киль». Джеймс Ватт также предлагает аналогичное решение через 18 лет.

Первое воплощение гребного винта в практику осуществилось в 1776 году с помощью изобретателя Дэвида Бушнелла. Американский музей хранит копию военной подводной лодки «Черепаша» с винтовым двигателем, но поскольку сама подлодка была уничтожена английским противником, история оспаривается некоторыми исследователя-

ми. Изобретение и воплощение чешско-австрийского ученого Йозефа Ресселя (1827 - 1829) не было по достоинству оценено во время его жизни. Бронзовый гребной винт с коническим основанием и лопастями, установленный на корабле «Чиветта» развивал скорость до 11 км/ч, паровая машина не выдержала продолжительного испытания, испытания были прекращены. В 1880 году гребной винт получил свою окончательную, сохраняющуюся и по сей день форму, пережив аналоговые решения.

Наука динамики жидкостей (перемешивание лишь составная ее часть) появилась в работах Л. Эйлера и Й.Л. Лагранжа ориентировочно в 1750-х годах.

Основные уравнения движения идеальной жидкости были сформулированы Леонардом Эйлером, одним из основоположников механики сплошных сред и большую часть жизни жившим в С-Петербурге. Его прах покоится рядом с прахом М.В. Ломоносова в пантеоне Александро-Невской лавры. Наряду с Эйлером, Жозеф Луи Лагранж (1736 – 1813) является создателем дифференциальных уравнений движения частиц несжимаемой идеальной жидкости в переменных Лагранжа. При условии несжимаемости жидкости прослеживается четкая связь между уравнениями неразрывности, записанными в переменных Эйлера и переменных Лагранжа. Для случая потенциальных течений используется интеграл уравнений движения идеальной жидкости (или уравнений Эйлера) – интеграл Коши – Лагранжа.

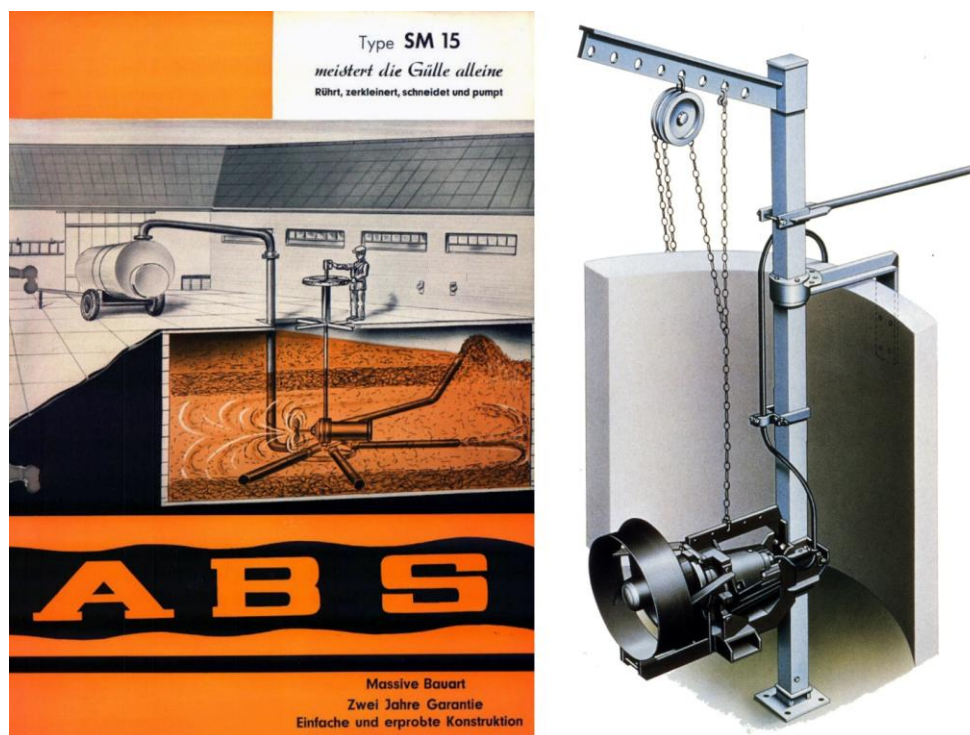
Глубокое изучение механики жидкости и статистической теории турбулентности представлено в работах английского ученого Джеффри Инграма Тейлора (1886 – 1975), иностранного члена АН СССР. Он внёс фундаментальный вклад в теорию турбулентности: разработал теорию устойчивости течений вязкой жидкости, теорию турбулентной диффузии, создал полуэмпирическую теорию турбулентности, исследовал однородную и изотропную турбулентность, решил уравнения Навье-Стокса (Клод Дюис Навье и Джордж Габриэль Стокс), которые демонстрирует турбулентность.

История не простит, если не обозначить Архимеда с исследованиями состояния плавающих тел, Исаака Ньютона изучавшего явление вязкости, Блез Паскаля – автора основного закона гидростатики, Даниэля Бернулли с первым математическим описанием процессов гидродинамики, Вильяма Фруда с разработкой критерия подобия движения жидкостей, Людвига Прандтля с разработкой теории пограничного слоя, Осборна Рейнольдса и выдающегося советского математика Андрея Николаевича Колмогорова, которые развили осознание понятий вязкости жидкости и перемешивания до совершенства.

Поскольку тема охватывает предмет погружных мешалок важно зафиксировать этап возникновения погружных электродвигателей. Первый насос с *погружным* электродвигателем был изобретен (до 1916 г. в России), сконструирован и изготовлен (1930 год) Армаисом Арутюновым. После эмиграции в США им была основана фирма REDA (Russian Electrical Dynamo of Arutunoff), производившая насосы с охлаждением двигателя в потоке движущейся вверх нефти. Технология, предложенная им, быстро заняла ведущее место в нефтедобыче, как лидер погружных насосов с количеством патентов более 90 ед.

Первые мешалки с погружными электродвигателями были изготовлены значительно раньше, чем запатентованы. Это событие осуществили шведы (фирмы ABS и Flygt) совсем не для цели очистки сточных вод, а для перемешивания навозных стоков и предот-

вращения льдообразования (1958 – 1965 г.г.), рис. 1. А первые внедрения в очистку сточных вод мешалок (лопастного типа) были осуществлены по аналогии с химико-технологическим оборудованием на базе вертикальных валов с «сухими» электродвигателями.



**Рис. 1.** Первые погружные мешалки шведского происхождения для перемешивания навозных стоков и предотвращения льдообразования фирм: а) ABS, б) Flygt

Первые ключевые патенты относятся к периоду 1951 – 1976 г.г.: механическое торцевое уплотнение для предотвращения течи воды в статор – Лоуренс Смит (US 2 554 595), погружная мешалка – Норман Паркер (US 2 965 364), погружная мешалка в очистке сточных вод – Рудольф Пёрш (US 3951 758). К концу 1970-х годов проводится патентование и изготовление специальных погружных мешалок горизонтального потока и установочных аксессуаров при очистке сточных вод – американцы Бэри и Рой Крамеры, швед Хальмар Фраез и др. Собственно в этот период начали устанавливаться первые погружные мешалки для поддержания процессов денитрификации.

## 2. Типы мешалок для коридорных аэротенков

Для поддержания активного ила во взвешенном состоянии обычно устанавливаются электромеханические мешалки. Двигатели мешалок могут быть исполнены в соответствии с защитой IP54 или IP68.

IP54 предполагает, что двигатель не погружной, но в достаточной степени противостоит пыли и любому дождю. Мешалки на базе такого двигателя, как правило, с длинным

вертикальным валом, рис. 2. Перемешивающие потоки обычно направлены вертикально к днищу. Для установки единичного оборудования требуется обеспечить условие соотношения  $L/B \leq 2/1$ .



**Рис. 2.** Мешалки с вертикальным валом производителей: Invent (Германия), GSD (Тайвань), Xylem-ITT Flygt (Швеция)

IP68 – двигатель погружной, поэтому обычно этот вариант называют «погружными мешалками». Вал при этом короткий, потоки перемешивания в большинстве случаев горизонтальные. Этот вариант заслужил в России наибольшую популярность. Два гидродинамических принципа перемешивания могут быть реализованы в аэротенках, назовем их условно: «зонный» и «карусельный».

*Зонный* предполагает, что одна мешалка не способна обслужить длинный коридор аэротенка, а ограничена максимально-возможной длиной зоны перемешивания:  $L \sim 2,5 \cdot (B-D)$ , где  $B$  – ширина или глубина (большая величина),  $D$  – диаметр лопасти мешалки. Как видите, неспособность обслуживания длинных сооружений вызвана геометрией поперечного сечения аэротенка. Естественное желание любого технолога «поставить мешалку помощнее и перемешать подлиннее», к сожалению, ограничено рамками обозначенной зависимости.

*Кarusельный* – мощную межкоридорную рециркуляцию иловой смеси, организованную мешалкой/ами:  $Q_{\text{рец}} \sim (40 \div 200) \cdot Q_{\text{исх}}$ , где мешалка обретает способность обслуживания смежных коридоров.

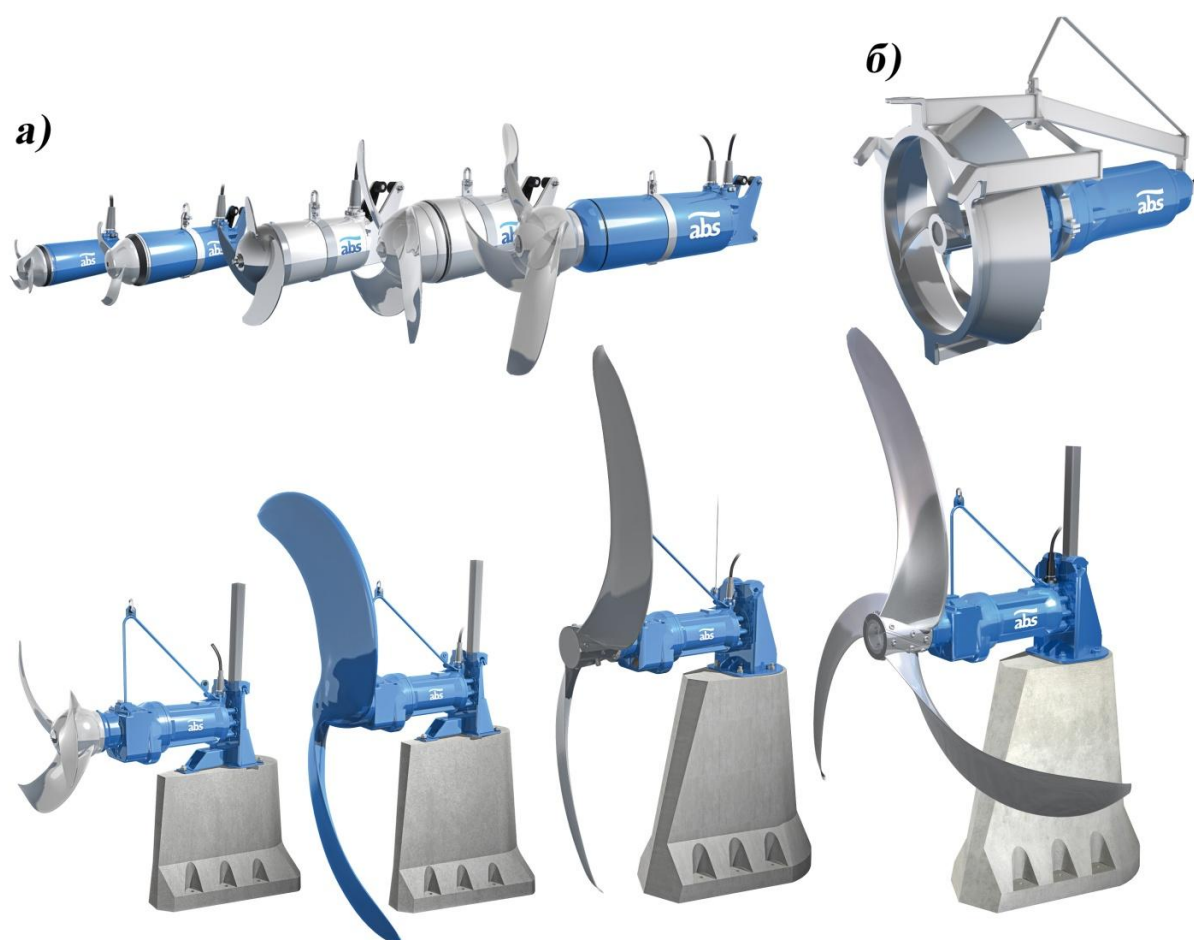
Погружные мешалки в классическом выражении подразделяются на:

- *Высокооборотные* безредукторные, что обеспечивается прямым приводом на вал и высокой скоростью вращения  $\sim 360 - 1400$  об/мин в зависимости от диаметра рабочего колеса ( $\sim 0,8 - 0,14$  м) и мощности двигателя ( $\sim 0,4 - 30$  кВт),
- *Низкооборотные* редукторные с широким спектром технических характеристик, но все же постараемся обозначить их, используя характерные предназначения, связан-

ные с обслуживанием размаха (или диаметра) лопастей крупного размера 1,2 – 2,75 м, при скорости вращения ~ 17 – 98 об/мин, и мощности двигателя ~ 0,5 – 7,5 кВт,

- *Среднеоборотные*, как правило, редукторные, занимающие промежуточное положение (фирмы-производители по разному классифицируют их функциональную зону).

С середины 1970-х годов появляется оборудование, способное осуществлять роль рециркуляторов иловой смеси – мешалки, снабженные погружным электродвигателем (IP68), которые при горизонтальном размещении в коридорных аэротенках, с успехом внедряются для обеспечения принципа продольной рециркуляции, рис. 3. Чуть позже, на базе тех же мешалок были разработаны рециркуляционные осевые насосы для обеспечения межзонной (аэробная, аноксидная, анаэробная) рециркуляции.



**Рис. 3.** Современные погружные мешалки XRW и XSB (а) и насосы XRCP (б) как рециркуляторы потока на примере ABS (Sulzer)

До 2007 года не существовало единого критерия оценки мешалок в области использования – очистка сточных вод. Промышленное развитие средств перемешивания потребовало обозначить расчетный параметр, одинаково понятный как проектировщикам, так и производителям оборудования. Международный стандарт ISO 21630[1] определяет рас-



четный параметр: «Измерения напора (давления) и расхода не включаются в рассмотрение. Основным расчетным параметром является тяга».

Основными задачами настоящего стандарта являются:

- увеличение однородности / совместимости характеристик, что позволяет производить сравнение мешалок,
- упрощение общения между заказчиком и поставщиком, и защита клиентов,
- сокращение потребности в документации,
- повышение качества и эффективности для обоих процессов: машиностроения и очистки.

*Тяга (Thrust)* измеряется в Ньютонах, ее величина рассматривается как сила осевого давления, вызванного работой лопастей мешалок на опору. Т.о. под тягой погружной мешалки подразумевается ее реактивная составляющая.

Практикой предполагается, что проектировщик оценивает требуемую силу тяги исходя из проектных величин: объема и формы резервуара, скоростей перемешивания. Затем из каталожных данных производителей выбирает подходящую по тяге мешалку и ее марку.

Вместе с тем, логика [1] нарушается некоторыми производителями, не содержащими величин тяги в прямом каталожном доступе (вероятно они носят внутренний характер ДСП). Понятно, что такое оборудование из сравнения выпадает.

Поскольку одинаковая тяга реализуется на практике различной конструкцией погружных мешалок (диаметр и форма лопастей, наличие редуктора с определенным передаточным числом или его отсутствие) для сравнения удобно пользоваться относительной величиной – *удельная эффективность*, Н/кВт. За характеристику мощности принимается ее потребляемая величина в рабочей точке, как соответствующая реальным энергозатратам. Мощность погружных мешалок характеризуют величины: установленная мощность собственно электродвигателя (характеризует энергозатраты достаточно ориентировочно), максимальная мощность (характеризует способность электродвигателя выдержать кратковременное увеличение нагрузки, например пусковой), мощность на валу (не учитывает КПД электродвигателя и  $\cos \phi$ ), потребляемая мощность (учитывает КПД электродвигателя и величину  $\cos \phi$  при 100%-ной нагрузке).

Бытует интерес читателей относительно целесообразности конструирования 2-х или 3-лопастных низкооборотных мешалок. Мнения производителей на данный вопрос не однозначны.

### 3. Принципы расстановки мешалок

Принципы расстановки мешалок в сооружениях различных конфигураций и их ориентация – это отдельная тема, требующая глубокого анализа. Производители, как правило, справляются с этим заданием. Проектировщикам рекомендуется знать следующее:

- исходными данными для подбора являются геометрические размеры зон или резервуаров для перемешивания, концентрация иловой смеси, сведения о предварительной механической очистке,

- производители не имеют унифицированного, общего для всех, способа оценки сопротивлений динамике потоков при перемешивании, кроме очень сложного для регулярных расчетов метода CFD-анализа,
- в качестве результата производители предлагают количество, марку мешалок с техническим описанием (размеры, мощность и т.п.) и набор установочных аксессуаров с подъемным устройством или без него. Но этого мало, следует потребовать схему размещения мешалок в резервуаре с размерами и углами установки мешалки по отношению к стенкам резервуара. Это очень важно, поскольку выбранная марка обязательно соответствует схеме ее размещения в резервуаре!
- Мешалки из каталогов производителей подбираются по показателю Тяга (Thrust), Ньютон.

При размещении погружных мешалок в резервуарах требуется соблюдать основные размеры глубины установки мешалки и ее позиционирования по отношению к стенкам резервуара.

#### 4. Метод вычислительной гидродинамики

В настоящее время гидродинамические задачи (перемешивания в частности) могут быть решены численными методами вычислительной гидродинамики для ньютоновских жидкостей (например, метод компьютерного анализа CFD), экспериментальными методами трассирования, прямых замеров величин скоростей и визуализации потока жидкости. Позволяет путем численного решения основных уравнений гидродинамики для конкретного сооружения определить структуру потока (поля скоростей и давлений), включая двухфазные системы с подачей воздуха.

Процесс анализа механики жидкостей (и газов) выполняется численным методом с алгоритмами решений на базе уравнений Навье-Стокса, неразрывности струи, учета сопротивлений системы, уравнений Эйлера. Результатом численного решения является поле скоростей и давлений движущейся жидкости.

Течение вязкой несжимаемой жидкости в рамках механики сплошной среды описывается системой уравнений неразрывности среды (струи) Навье-Стокса:

$$\begin{cases} \rho \left( \frac{d\bar{v}}{dt} + \bar{v}(\bar{\nabla}; \bar{v}) \right) = -\bar{\nabla}p + \mu \Delta \bar{v}; \\ \operatorname{div} \bar{v} = 0, \end{cases}$$

$$\text{где } \bar{v} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} - \text{вектор скорости; } \bar{v} = \begin{pmatrix} \frac{d}{dx} \\ \frac{d}{dy} \\ \frac{d}{dz} \end{pmatrix}; \Delta = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2}$$

$\mu$  – коэффициент вязкости,

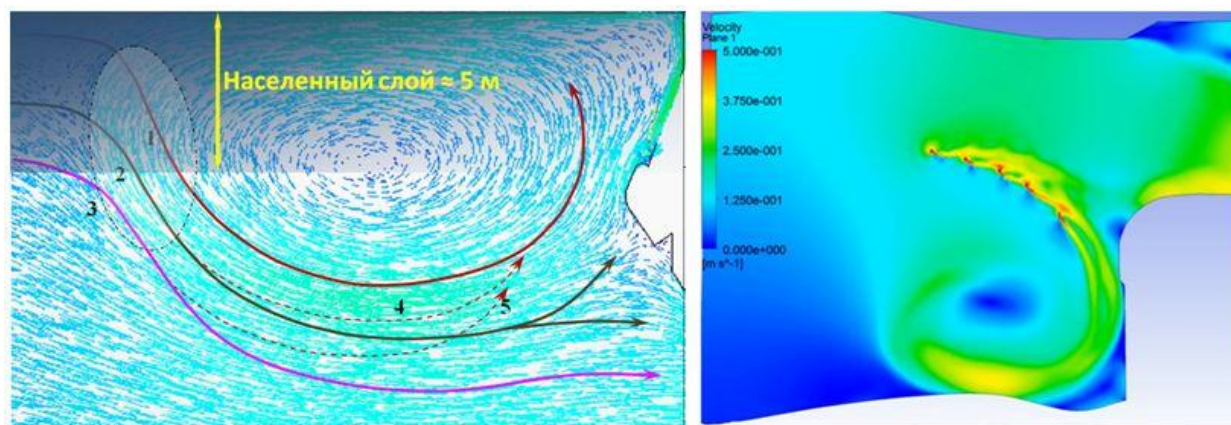
$p$  – давление,

$t$  – время

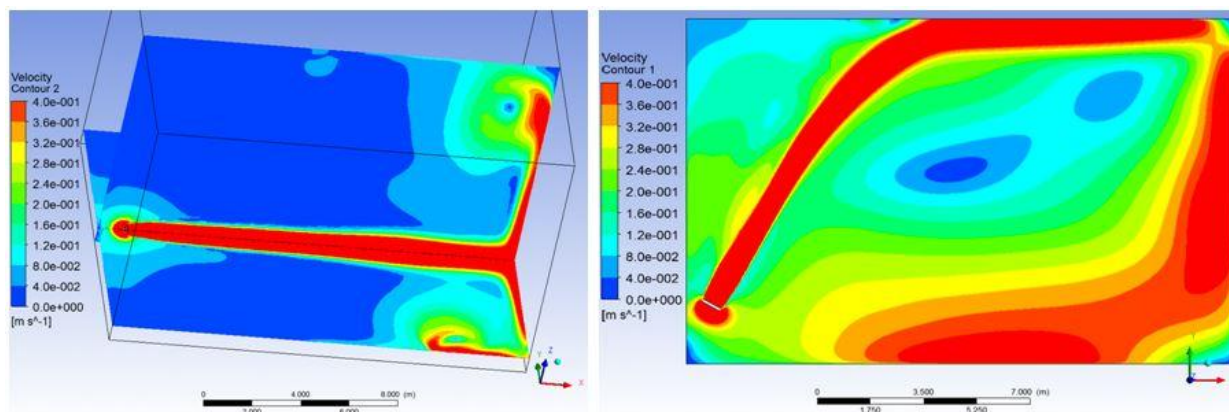
Примером стандартного ПО для систем водоочистки и гидромеханики является ANSYS Fluent, ANSYS CFX разработчика ANSYS, Inc (США):

<http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics>

Нами использовалось для решения задач: разработки рыбозащитных сооружений на основе потокообразующих устройств ГЭС и ГАЭС [2], рис. 4; перемешивания в аэротенках [3], рис. 5.



**Рис. 4.** а) Численный расчет полей течения систем рыбозащитных устройств вблизи водоприемных окон ГЭС, фронтальный вид модели вихря, формируемого струегенератором на основе распределенных конических сопел, б) численное решение рыбоотвода (двумерная модель) в комфортную зону обитания, формируемого потокообразователем (на основе виртуально установленных в последовательном порядке погружных мешалок)



**Рис. 5.** Расчетный пример расположения мешалки в денитрификаторе: а) реального, но не правильного позиционирования, б) требуемого к устройству позиционирования

Проектирование, компьютерный анализ гидродинамических систем и подбор реального оборудования рассматривается как единый и неразрывный комплекс мероприятий

## Заключение

По коду специальности 05.04.13. Гидравлические машины, гидропневмоагрегаты кафедрой Э10 могут быть проведены научно-исследовательские работы, таблица 1.



**Таблица 1.** Возможные научно-исследовательские работы, направленные на разработку мешалок с двигателями погружного типа

| <b>Характеристика</b>              | <b>Раскрытие</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Актуальность исследования          | 1 – Экологическая, предполагает улучшение качества очистки сточных вод от внедрения новой техники,<br>2 – Техническая, определяется разработкой методики проектирования, основанной на последних достижениях в САПР технологиях, вычислительной гидромеханике по созданию рабочих органов мешалок.<br>3 – Техническая, определяется разработкой методики проектирования резервуаров для перемешивания.                                             |
| Объект исследования                | 1 – рабочий орган (пропеллер),<br>2 – резервуар (взамен проточной части насосного агрегата)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Цель исследования                  | Разработка метода проектирования моноблочной высокооборотной (безредукторной) или низкооборотной (безредукторной) мешалки                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Задачи исследования                | 1 – Метода параметризации и автоматического построения геометрической формы пропеллера мешалки,<br>2 – Разработка модели (методики) оценки перемешивающей способности пропеллера мешалки в резервуарах,<br>3 – Проверка работы модели (методики) в натурных условиях крупных резервуаров,<br>4 – Верификация результатов численного моделирования в натурных условиях путем сравнения характеристик, полученных методами численного моделирования. |
| Методы исследования                | 1 – Математическое моделирование гидродинамических процессов,<br>2 – Автоматизированное 3D-моделирование с использованием объектно-ориентированных языков программирования,<br>3 - Математические методы поиска оптимальных решений,<br>4 - Комплексная верификация результатов численного моделирования.                                                                                                                                          |
| Научная задача                     | Заключается в разработке методов и алгоритмов, позволяющих выполнить разработку рабочих органов мешалок, а также комплексную верификацию расчета путем сравнения данных, полученных в результате численного гидродинамического моделирования, с экспериментальными.                                                                                                                                                                                |
| Научная новизна                    | 1 – Методика является комплексной, включающей в себя этапы автоматизированного построения 3D моделей.<br>2 – Предлагаемая методика рассматривает параметр тяга (Ньютон) как базовый для оценки характеристики моноблочной высокооборотной (безредукторной) или низкооборотной (безредукторной) мешалки,<br>3 – Возможно патентование элементов (полезная модель).                                                                                  |
| Практическая ценность              | 1 – Применение разработанной методики в ходе проектирования позволяет повысить энергоэффективность и надежность моноблочных мешалок,<br>2 – Рекомендации по оптимальному проектированию резервуаров перемешивания,                                                                                                                                                                                                                                 |
| Внедрение результатов исследования | Результаты работы предполагается использовать при проектировании объектов ВКХ.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

## Список литературы

1. ISO 21630: 2007. Pumps – Testing – Submersible mixers for wastewater and similar applications. / International Standard. // ISO /Standards catalogue. ISO copyright office, Published in Switzerland. First edition 2007-08-15. 21 p. Режим доступа: [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm?csnumber=35953](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=35953) (дата обращения: 15.06.2015)
2. Баженов В.И., Петров В.И., Бухаров К.Д., Иванов А.В., Филиппов Г.Г. Разработка и численное моделирование рыбозащитных сооружений на основе потокообразующих устройств. // Гидротехника. М.: ГидроПромСтрой. 2014. № 1 (34). С. 108 – 112.
3. Баженов В.И., Эпов А.Н., Гусаров О.С. Применение метода компьютерной симуляции гидродинамики потоков (CFD) для оптимизации конструкции аэротенка // Водоснабжение и канализация. М.: НиКа. 2009. № 3. С. 53-59.