



70203222/0615
Возможны технические изменения. Название Grundfos, логотип Grundfos и Be Think Innovate являются зарегистрированными торговыми марками, принадлежащими Grundfos Management A/S или Grundfos A/S, Дания.



РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗМЕЩЕНИЮ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ
УСТРОЙСТВ В СООРУЖЕНИЯХ ВОДООТВЕДЕНИЯ

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗМЕЩЕНИЮ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СООРУЖЕНИЯХ ВОДООТВЕДЕНИЯ



Заявление об ограничении ответственности

Данная книга не может являться техническим руководством для проектировщиков России и СНГ, т. к. некоторые справочные данные и методики в ней соответствуют Европейским и Американским, а не Российским стандартам. Книга предлагается Вашему вниманию для ознакомления с опытом зарубежных коллег, который может быть Вам интересен.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Процесс перемешивания является неотъемлемой частью современной технологии очистки сточных вод. Перемешивающие устройства участвуют во многих этапах процесса очистки стоков. Данный процесс включает в себя перемешивание веществ с различными характеристиками и смешивание в баках самых разных размеров и форм. Оборудование может устанавливаться как в технологических резервуарах с перекачиваемой средой, либо в резервуарах, снабженных системами аэрации, так и в резервуарах с другими условиями, которые требуют особого внимания.

Правильный подбор и расположение перемешивающего оборудования имеют большое значение, поэтому в настоящем руководстве особое внимание уделено процессам перемешивания, применяемым на очистных сооружениях водоотведения. Однако основные параметры процессов перемешивания и общие правила размещения оборудования могут также использоваться в других областях.

Правильная установка перемешивающего оборудования в технологических резервуарах очистных сооружений обеспечивает полное использование объема резервуара, а также быстрое перемешивание разных потоков, попадающих в резервуар. Кроме того, она обеспечивает возможность протекания биохимических и химических процессов независимо от аэрации. Это особенно важно для очистных сооружений водоотведения, которые должны выполнять требования по удалению биогенных элементов.

Правильный подбор и расположение оборудования крайне важны для обеспечения оптимального перемешивания и минимального потребления электроэнергии. В то же время правильный подбор оборудования обеспечивает снижение его износа и тем самым сокращение эксплуатационных расходов. В настоящем Руководстве содержатся разработанные компанией Grundfos нормы и правила расположения оборудования для специалистов, занимающихся проектированием очистных сооружений сточных вод. В Руководстве также описаны основные принципы перемешивания с использованием погружного оборудования.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении столетий процесс перемешивания различных жидкостей, твердых веществ и газов является неотъемлемой составляющей ежедневной человеческой жизнедеятельности. Потребность в перемешивании существует во всех областях: от производства продуктов питания до производства химических и натуральных лекарственных средств, от распределения и разбавления жидкостей до их гомогенизации для бытовых и производственных целей.

С самого начала к очистке сточных вод предъявлялись неизменные требования: достижение максимально возможного уровня гомогенизации для разных жидкостей и твердых веществ, поддержание твердых веществ во взвешенном состоянии или ресуспендирование их, создание объемного потока с участием всего объема жидкости, а также создание горизонтальных потоков и многое другое.

Что потребовало, с одной стороны, определения физических параметров, управляющих движением и взаимодействием жидкости, а, с другой стороны, внедрения нового оборудования, обеспечивающего достижение этих задач.

В 2002 г. компания Grundfos приобрела швейцарскую компанию Arnold AG, обладающую десятилетиями опыта в производстве погружных мешалок и образователей потока. Это означает, что, помимо погружных канализационных насосов, у компании Grundfos появилась возможность производить погружное перемешивающее оборудование для очистки сточных вод, а также для сельскохозяйственной и биогазовой отраслей.

В настоящем Руководстве рассматриваются основные вопросы, касающиеся процесса перемешивания, а также областей его применения, при этом особое внимание уделено погружным мешалкам и образователям потока. Руководство предназначено для специалистов в области очистки сточных вод, проектировщиков, операторов установок, инженеров по сбыту, а также для всех тех, кто хочет разобраться в вопросах процесса перемешивания и областей его применения.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	1
----------	---

[1] ОСНОВЫ

Введение в процесс перемешивания	8
----------------------------------	---

Краткий исторический обзор: от мешалки вертикальной установки до погружной мешалки	8
--	---

Мешалки и образватели потока на очистных сооружениях водоотведения	10
--	----

Механическая очистка	11
----------------------	----

Биологическая очистка	11
-----------------------	----

Доочистка	11
-----------	----

Обработка осадка	12
------------------	----

Различия между основными типами перемешивающего оборудования	13
--	----

Основные параметры процесса перемешивания	14
---	----

Что общего между мешалками и насосами	14
---------------------------------------	----

Мощность и напор	15
------------------	----

Поток	17
-------	----

Осевое усилие	17
---------------	----

Теория гидравлики и реологии	19
------------------------------	----

Динамическая и кинематическая вязкость	20
--	----

Ньютоновские и неньютоновские жидкости	21
--	----

Число Рейнольдса и число мощности	22
-----------------------------------	----

Требования по оптимальной гидродинамической конфигурации	24
--	----

Вычислительная гидродинамика для процесса перемешивания	26
---	----

Вычислительная гидродинамика для моделирования потока перемешивания	26
---	----

Конструирование мешалок с использованием вычислительной гидродинамики	30
---	----

Использование CFD для моделирования потока	32
--	----

Образование и распределение осевого усилия	33
--	----

[2] РЕКОМЕНДАЦИИ И ПРАВИЛА

Некоторые аспекты применения мешалок и образвателей потока	36
--	----

Выбор перемешивающего оборудования: важнейшие аспекты	36
---	----

Зачем нужно перемешивание?	36
----------------------------	----

Характеристики перекачиваемой жидкости	36
--	----

Форма резервуара	37
------------------	----

Наличие систем аэрации	38
------------------------	----

Места расположения точек входа и выхода жидкости в резервуаре	38
---	----

Доступность бака для установки перемешивающего оборудования	38
---	----

Выбор подходящего типа перемешивающего оборудования	38
---	----

Цели перемешивания и примеры областей применения	38
--	----

Перемешивание, суспендирование и гомогенизация	38
--	----

Усреднительный резервуар	40
--------------------------	----

Биохимические процессы (дефосфация, денитрификация, нитрификация)	41
---	----

Процесс периодического перемешивания на крупных и средних насосных станциях	44
---	----

Гомогенизация накопленного осадка	
-----------------------------------	--

(сырого осадка и избыточного активного ила)	45
---	----

Дисперсия химических реагентов в сточных водах/осадках сточных вод	45
--	----

Правила	46
---------	----

Общие рекомендации по выбору места установки	46
--	----

Предотвращение появления коротко замкнутых потоков	47
--	----

Интенсивное и непосредственное перемешивание различных потоков	47
--	----

Исключение завихрения на поверхности воды: легкое перемешивание	47
---	----

Предотвращение появления застойных зон	48
--	----

Общие правила выбора места установки	48
--------------------------------------	----

Минимальная глубина погружения для предотвращения завихрений	48
--	----

Минимальное расстояние до дна и боковых стенок резервуара	49
---	----

Минимальное расстояние до задней стенки	54
---	----

Минимальное расстояние до препятствий	58
---------------------------------------	----

Мешалки, направленные вверх и вниз	58
------------------------------------	----

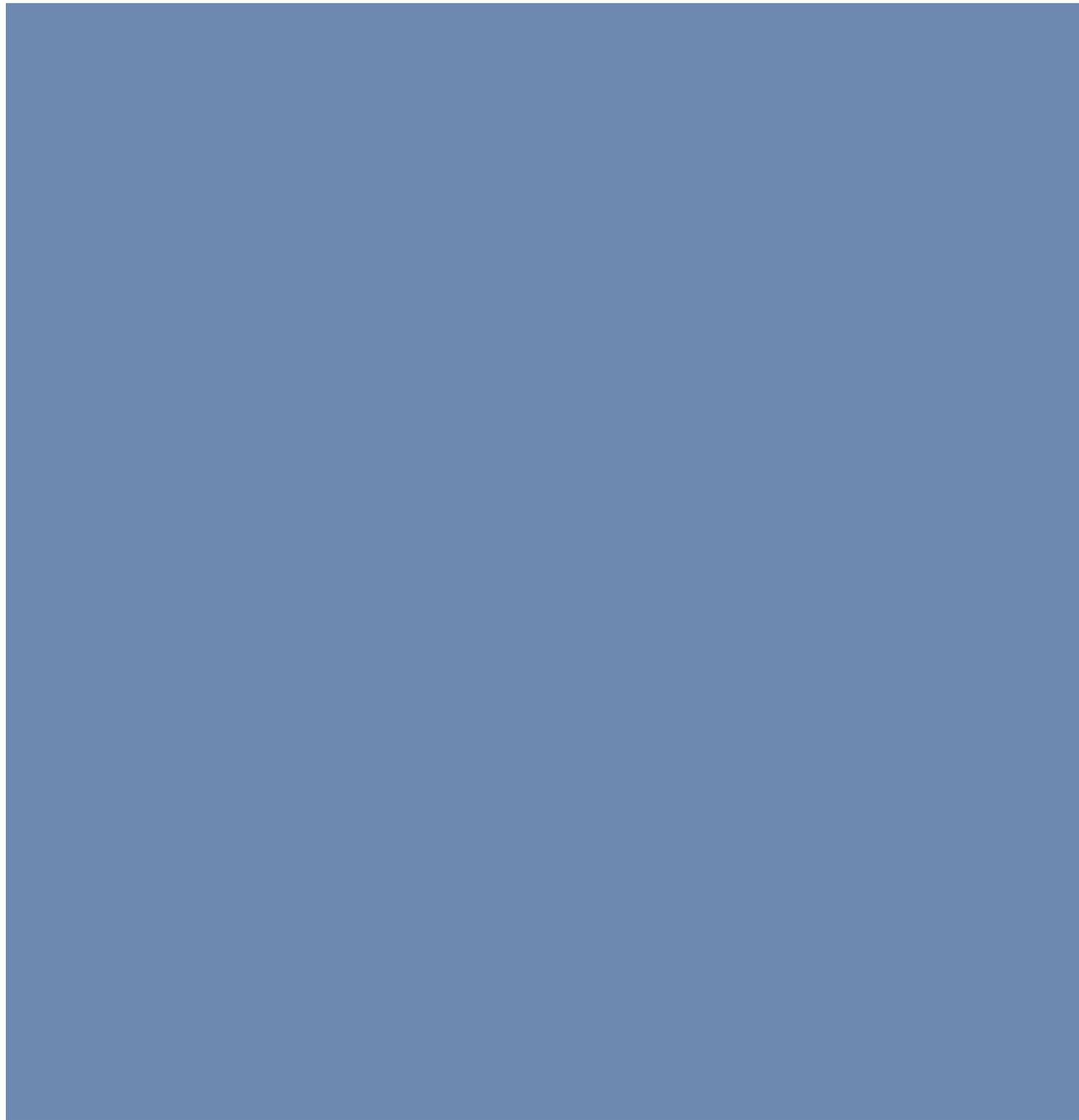
Расположение в горизонтальной проекции	59
--	----

Общие правила размещения для аэрируемых резервуаров	76
Введение	76
Вертикальное расположение погружных мешалок и образователей потока	77
Особые правила расположения для замкнутых резервуаров	80
Размещение образователей потока в окислительных каналах	80
ПРИМЕР ИЗ ПРАКТИКИ: формирование противотока – CFD моделирование для очистных сооружений парка La Feyssine-Lyon WWTP	84
Нехватка свободного места: что делать?	84
Размещение образователей потока в аэрируемых резервуарах в форме кольцевого канала	85

[3] УСТАНОВКА, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ

Установка и эксплуатация	88
Монтажный комплект для мешалок и образователей потока	88
Стойка из профиля, фиксаторы, кран-балка	88
Монтажный комплект для мешалок	89
Монтажный комплект для образователей потока	91
Эксплуатация	92
Предварительная проверка мешалок/образователей потока	92
Порядок установки мешалок/образователей потока	93
Ввод в эксплуатацию	94
Техническое обслуживание	94
Основные условия для эффективной работы оборудования	94
Преимущества регулярного технического обслуживания	94
Диагностика неисправностей: проблемы при эксплуатации	94
Регулировка: частотно-регулируемый привод и другие области способы	95
ПРИМЕР ИЗ ПРАКТИКИ: точная регулировка образователей потока AFG на очистных сооружениях водоотведения Lyon-La Feyssine за счет использования частотно-регулируемых приводов	96

Измерение параметров	99
Измерение концентрации твердых частиц	99
Метод измерения	99
Оборудование для измерения	99
Измерение скорости	99
Оборудование для измерения	100
Измерение средних характеристик	100
Расположение измерительной сетки в замкнутых резервуарах	101
Расчет средней горизонтальной скорости	102
Испытание оборудования на испытательных установках Grundfos	103
Оптимизация системы	105
Введение	105
Результат оптимизации конфигурации резервуара	105
Сравнение квадратного или прямоугольного резервуара с резервуаром овальной формой	105
Замкнутые резервуары – влияние разных типов конфигурации	107
Результат оптимизации выбора оборудования	111
Замена мешалок образователями потока	111
ПРИМЕР ИЗ ПРАКТИКИ: замена мешалок образователями потока на очистных сооружениях водоотведения Douchy, Франция	114
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, СИМВОЛЫ И ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ	
Условные обозначения, символы и единицы измерения	118
Определения	119



[1]

ОСНОВЫ

ВВЕДЕНИЕ В ПРОЦЕСС ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

Краткий исторический обзор: от мешалки вертикальной установки до погружной мешалки

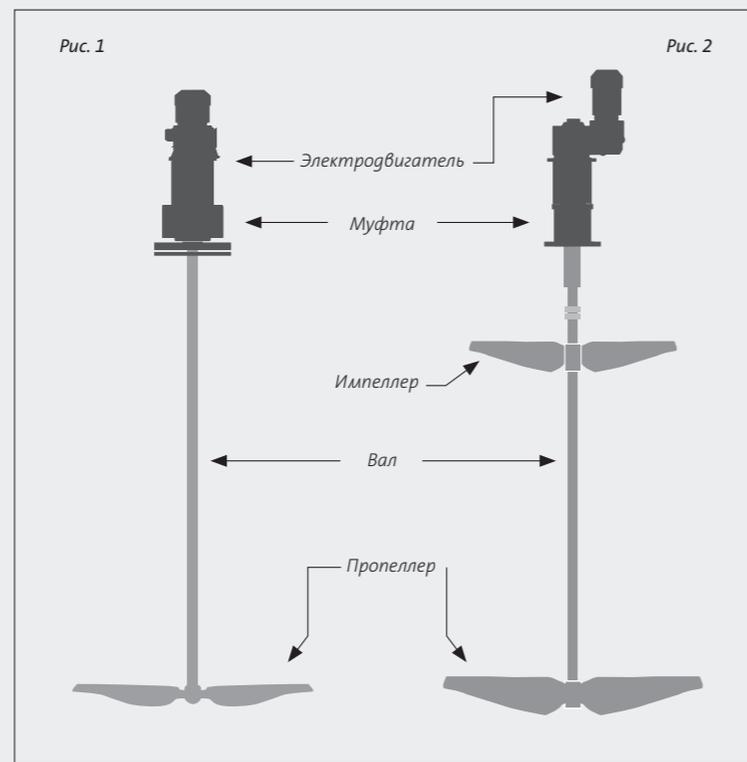
Понятие «перемешивание» относится к улучшению гомогенизации смесей жидкостей и твердых частиц. Чтобы разобраться в этом процессе, требуются глубокие технические знания.

Исторически технология применения для перемешивания различных жидкостей, а также жидкостей и твердых веществ была впервые разработана в производственных процессах.

В промышленности перемешивание является одной из самых основных операций. Оно играет важную роль, например, при производстве бумаги, химикатов, лекарственных средств и многого другого.

Перемешивание также имеет чрезвычайно большое значение при очистке сточных вод и является одной из ключевых операций для достижения необходимого качества очистки.

Очищаемые жидкости могут быть различными, как и цели перемешивания. Например, в химической промышленности перемешивание часто используется для получения однородной жидкости в максимально короткие сроки, тогда как при очистке сточных вод на некоторых этапах перемешивание используется для предотвращения осаждения с минимальным потреблением электроэнергии.



Для выполнения требований различных областей применения разрабатывались и продолжают разрабатываться все более совершенные перемешивающие устройства.

В производственных процессах конструкция оборудования для перемешивания состоит из стандартного электродвигателя сухого монтажа, редуктора (если требуется), соединительного устройства (муфта), вала и одного или нескольких пропеллеров и/или импеллеров.

Оборудование данного типа, называемые образователями потока (см. Рис. 3) и давно используется на различных этапах очистки сточных вод.

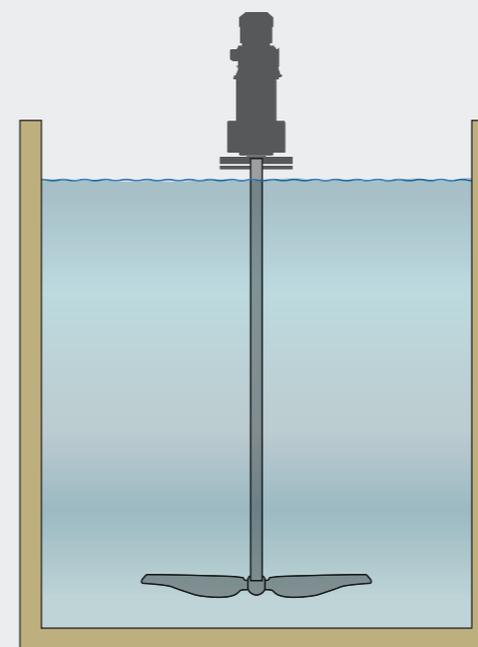


Рис. 3

В настоящее время область их применения связана, главным образом, со специфическими процессами такими как: анаэробное сбраживание осадка, гомогенизация тяжелого осадка, диффузия химических веществ для уплотнения осадка или для нейтрализации сточных вод.

В области очистки сточных вод появились многочисленные требования, связанные с потребностями процессов очистки и эксплуатационными расходами.

Выполнение этих требований было достигнуто за счет использования погружных мешалок, представляющие собой результат объединения погружного электродвигателя (с редуктором или без) с пропеллером. См. Рис. 4 и 5.

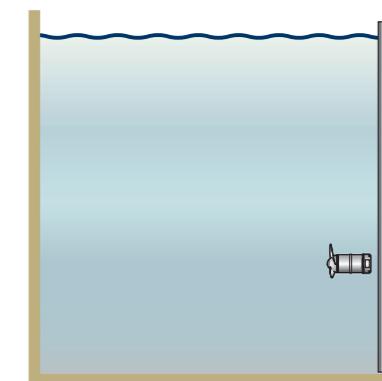
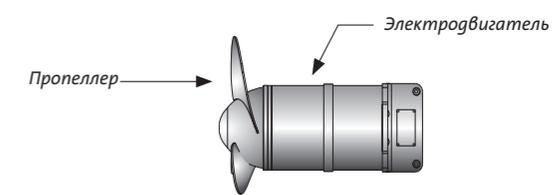


Рис. 4

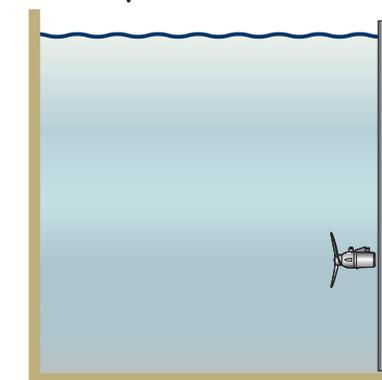
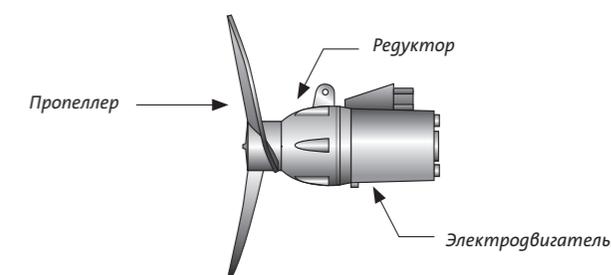


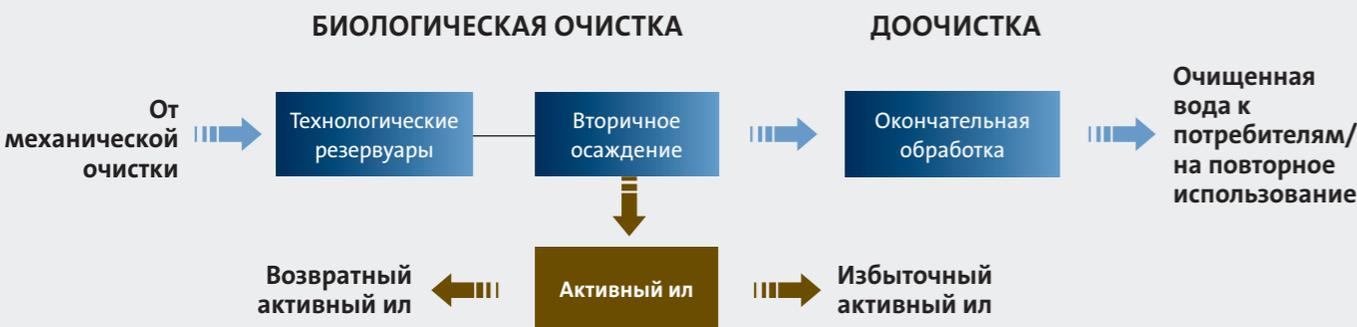
Рис. 5

Мешалки и образователи потока на очистных сооружениях водоотведения

Очистные сооружения водоотведения, использующие метод биологической очистки активным илом – Activated Sludge Process (ASP – см. схему технологического процесса на Рис. 6), имеют четыре этапа очистки, три из которых – механическая,

биологическая и доочистка – относятся к очистке сточных вод, а одна – обработка осадка – относится к процессам, в результате которых осадок становится биологически инертным.

На всех четырех этапах очистки применяются погружные мешалки и/или образователи потока, обеспечивающие гомогенизацию, перемешивание и суспендирование.



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА

Говоря о каждом этапе очистки сточных вод, мы можем применить высокооборотистые мешалки (Мешалки Grundfos) и низкооборотистые мешалки (Образователи потока Grundfos), как показано на Рис. 7.

Мешалки Grundfos размещаются в следующих местах:

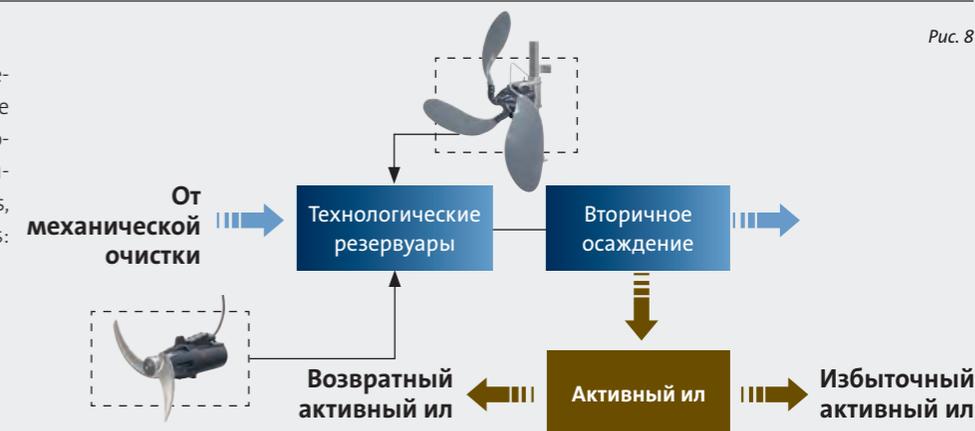
- Резервуары ливневой воды
- Приемные резервуары насосных станций
- Усреднительный резервуар



БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА

Технологические резервуары размещаются там, где проходят важнейшие биохимические процессы. Для процессов показанных на Рис. 8, применяются как мешалки Grundfos, так и образователи потока Grundfos:

- Дефосфотация
- Денитрификация
- Окисление
- Нитрификация



ДООЧИСТКА

Доочистка выполняется в случаях, когда требуется дальнейшее и более глубокое удаление органических и неорганических веществ из воды, поступающей от биологической очистки. На этом этапе применяются как мешалки так и образователи потока Grundfos, см. Рис. 9.



ОБРАБОТКА ОСАДКА

При обработке осадка мешалки Grundfos используются на следующих этапах, показанных на Рис. 10 ниже.

- **Хранение осадка**
- **Стабилизация осадка**

Перемешивание требуется также для нестандартных способов очистки активным илом, таких как последовательно-циклический реактор (SBR), мембранный биореактор (MBR) и биореактор с подвижным слоем (MBBR).

Особое внимание будет уделено подбору мешалок с подробным рассмотрением процессов MBR и MBBR, в которых концентрация твердых веществ достигает высоких значений.

**Различия между основными типами перемешивающего оборудования**

По причине различий между двумя наиболее распространенными типами мешалок – мешалок вертикальной установки и погружными мешалками – к ним предъявляются разные требования для применения в процессе очистки воды:

1) Возможность свободной регулировки по вертикали и горизонтали

В отличие от мешалок вертикальной установки, у которых положение пропеллера является фиксированным, положение погружной мешалки может регулироваться по вертикали и горизонтали в соответствии с требованиями процесса, геометрическими характеристиками резервуара, уровнем воды в резервуаре и т. д. См. Рис. 11 и 12.

2) Создание высокоэффективного перемешивания объемного потока

Тогда как пропеллер мешалки вертикальной установки приводит в движение жидкость с неравномерным распределением скоростей по объему (см. Рис. 13), а степень завихрения измеряется с учетом скорости течения на поверхности воды, погружная мешалка создает объемный поток, динамически вовлекая в движение полный объем жидкости (см. Рис. 14).

3) Бесшумность

Внешний электродвигатель/редуктор мешалки вертикальной установки является источником шума, тогда как погружная мешалка работает бесшумно, поскольку она находится в погруженном состоянии.

4) Легкость и быстрота выполнения технического обслуживания

Любая операция по техническому обслуживанию, плановая или внеплановая, требует демонтажа одного или более компонентов, таких как электродвигатель, редуктор, муфта, вал или пропеллер, при этом для демонтажа, технического обслуживания и повторного монтажа требуется значительное время. Погружная мешалка может быть демонтирована, обслужена и повторно смонтирована за гораздо меньшее время, чем мешалка вертикальной установки. И, наконец, что немаловажно, ее гораздо проще транспортировать в мастерскую.

5) Сокращение затрат на обслуживание

Это явное следствие простоты и быстроты обслуживания, о которой говорилось выше.

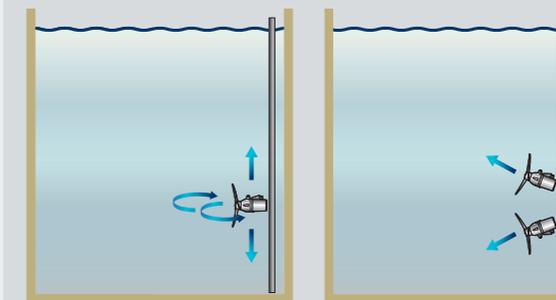


Рис. 11: Возможные варианты регулировки местоположения как по вертикали, так и по горизонтали

Рис. 12: Изменение направления объемного потока жидкости как по вертикали, так и по горизонтали

Погружная мешалка создает объемный поток, динамически вовлекая в движение полный объем

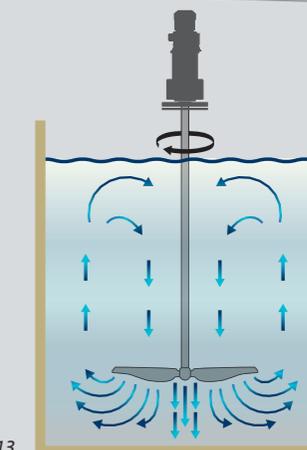


Рис. 13

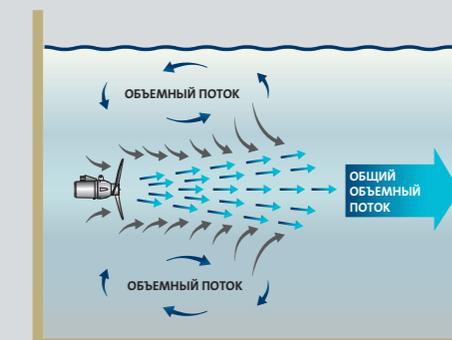


Рис. 14

Основные параметры процесса перемешивания

Процесс перемешивания характеризуется рядом основных параметров, таких как:

- МОЩНОСТЬ
- РАСХОД
- НАПОР ИЛИ НАПРЯЖЕНИЕ СДВИГА
- ОСЕВАЯ СИЛА

Для заданного перемешиваемого объема резервуара, создаваемый мешалкой поток должен повлечь к движению за собой как можно больший объем жидкости, что означает объемный поток. Другими словами, общий установившийся в резервуаре режим потока, создаваемый мешалкой или образвателем потока, должен привлекать в движение максимально возможный объем жидкости.

Это обеспечивает наилучшее распределение скоростей потока и напряжений сдвига в объеме воды.

ЧТО ОБЩЕГО МЕЖДУ МЕШАЛКАМИ И НАСОСАМИ

Если рассматривать поглощение энергии и энергопотребление, рабочие характеристики мешалки очень схожи с характеристиками насоса (см. Рис. 15), поскольку:

- электроэнергия потребляется от сети
- энергия преобразуется из электрической (1) в механическую (2)
- энергия преобразуется из механической в гидравлическую (3)
- эта энергия передается объему жидкости для разных целей: в данном случае – для перемешивания, тогда как в случае с насосом целью является ее подъем на определенную высоту

Если рассматривать баланс энергии (потенциальная плюс кинетическая), мешалка отличается от насоса, поскольку:

- гидростатический напор h (геодезический для насоса) равен почти нулю
- динамический напор $v^2/2g$ (или кинетическая энергия) является определяющим в балансе энергии

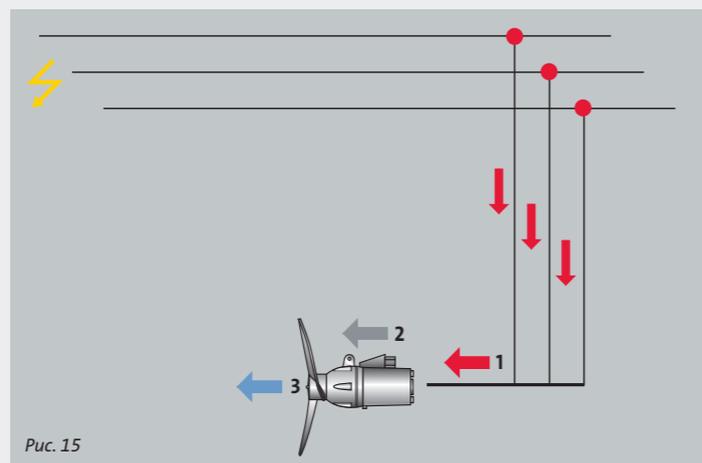


Рис. 15

Если, учитывая среднюю скорость жидкости v_1 на участке 1 на входе в мешалку и среднюю скорость жидкости v_2 на участке 2 на выходе из мешалки, мы применим уравнение Бернулли (закон сохранения энергии) для реальных жидкостей, не принимая во внимание потери, вся мощность на валу теоретически преобразуется в кинетическую энергию и передается жидкости, как показано на Рис. 16:

$$v_1^2 / 2g \cong v_2^2 / 2g$$

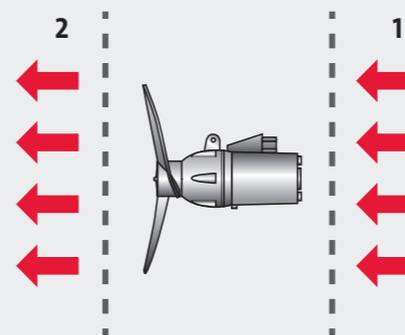


Рис. 16

МОЩНОСТЬ И НАПОР

Как и в случае с насосом, зависимость между мощностью P , расходом q и напором H (здесь скоростной напор или напряжение сдвига) у погружной мешалки остается той же:

$$P \approx qH$$

Энергия, передаваемая от электросети через мешалку (см. Рис. 17) жидкости, приведет к образованию потока q и скоростного напора (или напряжения сдвига) H . Часть энергии, разумеется, будет рассеяна в виде тепловых потерь.

Высокая эффективность перемешивания при гомогенизации, смешивании и суспендировании твердых частиц получится при самой эффективной передаче энергии и ее преобразовании в поток и скоростной напор.

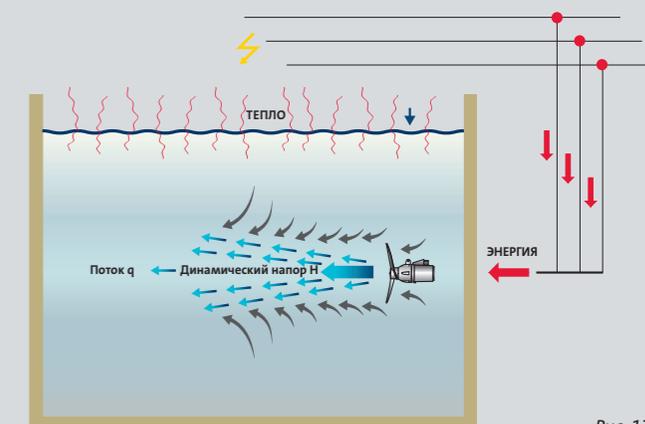


Рис. 17

Приведенное выше выражение пропорциональности между P и qH ведет к выражению так называемого Числа мощности N_p , которое определено на стр. 22.

Поток q может быть представлен как $n \times D^3$, поскольку $q = \text{скорость} \times \text{поперечное сечение} A$, таким образом, $n \times D \times D^2 = n \times D^3$, где n – частота вращения в об/мин, а D – диаметр пропеллера.

Скоростной напор $H \approx v^2$, таким образом, $H \approx n^2 \times D^2$.

Мощность P , таким образом, $n \times D^3 \times n^2 \times D^2 = n^3 \times D^5$, а точнее: $P = N_p \times n^3 \times D^5 \times \rho$, где N_p – число мощности в относительных единицах, связывающее силу сопротивления с силой инерции. ρ – плотность жидкости кг/м³

Для мощности погружных мешалок даны следующие различные выражения (см. Рис.18):

- $P_{1\text{ nominal}}$ = макс. потребление мощности для заданного электродвигателя
- $P_{1\text{ actual}}$ = потребление мощности в заданной рабочей точке
- $P_{2\text{ nominal}}$ = мощность на валу (номинальная мощность)
- $P_{2\text{ actual}}$ = мощность на валу в заданной рабочей точке
- P_p = выходная мощность на пропеллере в заданной рабочей точке

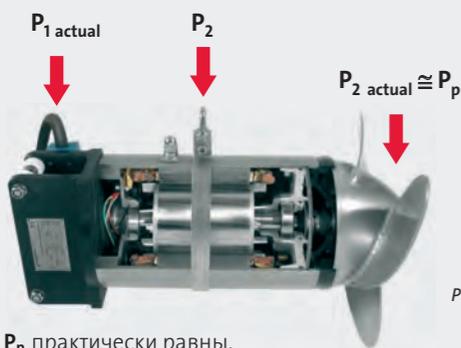


Рис. 18

$P_{2\text{ actual}}$ и P_p практически равны.

Полный электрический и гидравлический КПД в заданной рабочей точке могут быть определены через указанные ранее выражения мощности:

- **Электрический КПД η_E** – соотношение между мощностью на валу в заданной рабочей точке $P_{2\text{ actual}}$ и потреблением мощности $P_{1\text{ actual}}$ в заданной рабочей точке:

$$\eta_E = P_{2\text{ actual}} / P_{1\text{ actual}}$$

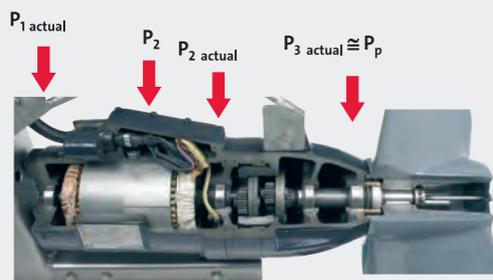
- **Гидравлический КПД η_H** – соотношение между мощностью на пропеллере P_p ($\cong P_{2\text{ actual}}$) в заданной рабочей точке и мощностью на валу P_2 :

$$\eta_H = P_p / P_2$$

Полный КПД η_T (КПД η_{w2w}) задается выражением:

$$\eta_T = \eta_{w2w} = \eta_E \times \eta_H$$

Для оценки полного КПД для мешалок, снабженных редуктором, должно учитываться промежуточное значение $P_{3\text{ actual}}$.



Еще одним учитываемым параметром является интенсивность перемешивания или удельная мощность перемешивания SmP .

Этот параметр представляет собой соотношение между мощностью на пропеллере P_p и объемом перемешиваемой жидкости. Это значение не зависит от типа мешалки, ее расположения и внешних факторов, влияющих на ее производительность.

Значение SmP выражается в $Вт/м^3$.

При различных процессах обработки сточных вод, таких как усреднение, денитрификация, дефосфотация, нитрификация и т. п. значение SmP для используемых погружных мешалок (или образователей потока) варьируется от **1,0** до **6,0 $Вт/м^3$** . Более высокие значения SmP относятся к удельной концентрации твердых веществ в сточной воде.

В прошлом проектировщики использовали в проектах перемешивающее оборудование для процессов очистки сточных вод с заданным значением данного параметра в диапазоне **20–30 $Вт/м^3$** , что приводило к превышению номинального размера электродвигателя перемешивающего оборудования по сравнению с фактическими потребностями данного процесса.



ПОТОК

Пропеллер мешалки создает **объемный поток** посредством прямого (или первичного) потока и **индуцированного** (или вторичного) потока, как показано на Рис. 19.



Рис. 19

Сумма первичного потока (прямого потока) и вторичного потока (непрямого или индуцированного потока) образует в результате **общий объемный поток**. См. Рис. 20.

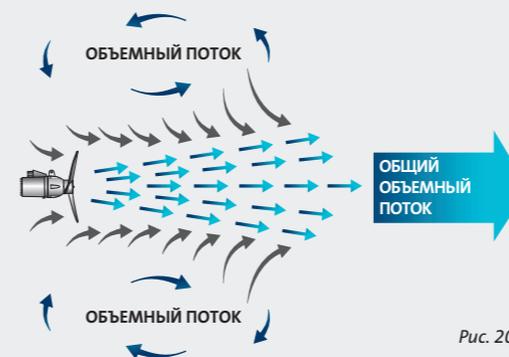


Рис. 20

Первичный поток – объем жидкости, перекачиваемый непосредственно пропеллером.

Вторичный поток – объем жидкости, индуцированный турбулентностью.

Выражаясь в терминах гидравлики, данная конфигурация потока является конфигурацией так называемого «местного сужения потока» (показано на Рис. 21). Обычно сужение потока образуется на участке потока жидкости, в котором диаметр самого потока является самым узким (см. сечение x на Рис. 21), и в котором скорость потока достигает максимального значения.

Такая ситуация возникает там, где поток выходит из форсунки или горловины, а также там, где, например, поток выходит от пропеллера. В сечении x на Рис. 21 струя отображается практически как горизонтальная.

Сам пропеллер действует в качестве конфузора между потоком на входе и потоком на выходе: на выходе из пропеллера линии течения жидкости сходятся и расходятся после сужения потока.

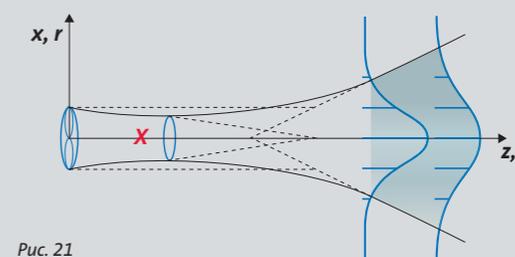


Рис. 21

ОСЕВОЕ УСИЛИЕ

Осевое усилие и напряжение сдвига – это ключевые параметры процесса перемешивания при использовании погружного оборудования. Понятие «**осевое усилие**» F является основным параметром в методике приемочных испытаний **МЕЖДУНАРОДНОГО СТАНДАРТА ISO 21630** для погружных моделей мешалок, которые определены в нем как «SM» или «мешалки».

На сегодняшний день производительность погружной мешалки определяется соотношением $R_{FP} = F/P_1$ между **осевой силой F** и **потребляемой мощностью P_1** .

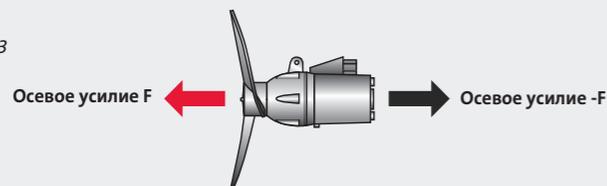
В области технологий, основанных на реактивном движении, осевое усилие представляет собой силу, действующую на судно, например, на подводную лодку (см. Рис. 22), причем направление осевого усилия противоположно направлению импульса силы реактивного движения.

Рис. 22



Основной и первичной целью перемешивания является перемещение жидкости. Соответственно, осевое усилие направлено на жидкость. Осевое усилие определяется как сумма осевых импульсов силы на единицу времени, передаваемых жидкости. Действующая на мешалку реактивная сила равна осевому усилию, но направлена в противоположную сторону. См. Рис. 23.

Рис. 23



Измерение осевого усилия в лаборатории выполняется путем измерения реактивной силы F . Что касается **размерной единицы осевого усилия**, представляющей собой сумму осевых импульсов силы на единицу времени, передаваемых жидкости, то значение осевого усилия задается **произведением масса \times скорость/время** и, таким образом, выражается как:

$$F [\text{кг} \times \text{м} \times \text{с}^{-2}]$$

Это соответствует произведению массы на ускорение, т. е. силе, поэтому осевое усилие F будет выражаться величиной **[килограмм-сила]**. Наконец, **осевая сила** выражается в единице **ньютон Н**, которая определяется следующим образом.

В единицах СИ один ньютон Н – это сила, необходимая для того, чтобы сообщить массе 1 кг ускорение 1 м/с². Поскольку масса в 1 кг воздействует на землю с силой (тяготения) около 9,8 Н (или 1 килограмм-сила), обычно говорят, что 10 Н равняется **1 кгс**.

Как уже отмечалось, по методике приемочных испытаний требуется измерение главного параметра, характеризующего работу мешалки, т.е. соотношения R_{FP} , определяемого как отношение **осевого усилия F к потребляемой мощности P_1** . Единицей измерения для этого соотношения будет **[Н/Вт]**. См. Рис. 24.

Рис. 24



ОСЕВАЯ СИЛА – МОЩНОСТЬ (ISO 21630)

Международный стандарт ISO 21630 «Насосы. Испытания. Погружные мешалки для сточных вод и аналогичных применений» был выпущен в августе 2007 г. и сводится к следующим задачам:

- повышение единообразия/совместимости характеристик оборудования для возможности сравнения мешалок
- упрощение взаимодействия между потребителем и поставщиком
- защита потребителя
- снижение потребности в документации
- повышение качества и эффективности как оборудования, так и технологических процессов

Важным параметром, связанным с эффективностью, определенным в международном стандарте 21630, является указанное выше соотношение R_{FP} , т. е. отношение осевого усилия F к потребляемой мощности P_1 .

Важность этого соотношения может быть проиллюстрирована с помощью примера погружной мешалки, создающей продольную скорость течения в замкнутом баке, например, окислительном канале. Потеря импульса потока за один оборот по каналу равна коэффициенту импульса, создаваемого погружной мешалкой в условиях квазиустановившегося состояния. Он задается осевым усилием F мешалки. Мощность, рассеянная в результате этой потери импульса, составляет $P = F \times u$, и это минимальная мощность необходимая для того, чтобы поток имел скорость u . Таким образом, эффективность установки будет определяться соотношением между рассеиваемой мощностью и потребляемой мощностью мешалки, т. е. $P/P_1 = F \times u/P_1$

В приведенной выше формуле свойства мешалки также могут быть изолированы от требований к системе, и это позволяет получить соотношение осевого усилия к потребляемой мощности R_{FP} . Это соотношение не является безразмерным, поскольку зависит от диаметра рабочего колеса и скорости его вращения, а не только от геометрических характеристик пропеллера. Большое количество существующих диаметров пропеллеров и скоростей вращения электродвигателей приводит к тому, что необходимо учитывать ряд других параметров помимо эффективного образования энергии продольного потока.

Параметры осевого усилия, мощности, R_{FP} , допустимой погрешности и соответствующие допуски указаны в Международном стандарте ISO 21630.

Для получения более подробной информации обратитесь к специалистам Grundfos.

ТЕОРИЯ ГИДРАВЛИКИ И РЕОЛОГИИ

Основой реологии и гидравлических режимов является определение параметров и понятий, таких как: вязкость, ньютоновские и неньютоновские жидкости, число Рейнольдса, число мощности и других, являющихся важными для лучшего понимания процесса перемешивания.

Реология является, главным образом, наукой о потоке жидкостей, а также о «нетвердых средах» или твердых веществах в условиях, при которых они реагируют пластичным течением, а не упругой деформацией при приложении к ним напряжения сдвига (силы).

Понятия реологии применяются к веществам, имеющим сложную молекулярную структуру, таким как шламы, взвеси, полимеры и другие стеклообразователи (такие, как силикаты), а также различные питательные вещества и добавки, биологические жидкости (например, кровь) и другие биологические материалы.



ДИНАМИЧЕСКАЯ И КИНЕМАТИЧЕСКАЯ ВЯЗКОСТЬ

Стандартный способ наглядного представления напряжения сдвига показан на Рис. 25. На рисунке видно, что две пластины перемещаются относительно друг друга, при этом одна пластина является неподвижной, а другая (верхняя пластина) движется параллельно неподвижной пластине с постоянной скоростью v в направлении оси x . Перемещение приводит в жидкости между пластинами к созданию в жидкости градиента скорости dv/dy , а также напряжению сдвига τ . Градиент разности скоростей dv/dy перпендикулярен направлению потока.

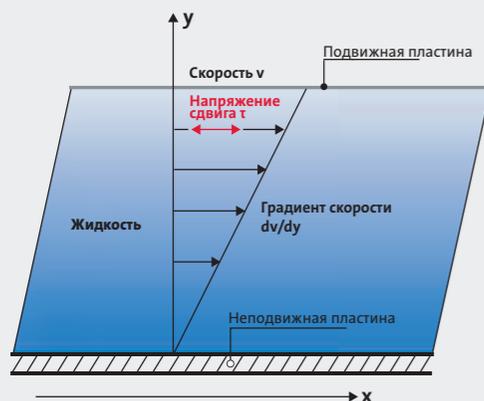


Рис. 25

Исаак Ньютон предположил, что напряжение сдвига τ для прямого, параллельного и однородного потока между слоями пропорционально градиенту скорости dv/dy в направлении, перпендикулярном слоям.

$$\tau = \mu \, dv/dy$$

Коэффициент пропорциональности μ называется **вязкостью**. Вязкость может быть определена как свойство жидкостей, описывающее их внутреннее трение или сопротивление деформации под сдвигающим усилием. Значение вязкости меняется в зависимости от типа жидкости и ее температуры. Вязкость жидкости снижается при повышении температуры; вязкость газа повышается при снижении температуры.

Так же вязкость μ называют как **динамической (или абсолютной)**.

Из соотношения $\tau = \mu \, dv/dy$ видно, что динамическая вязкость μ будет выражаться в **[Н х с/м²]** (или **[Па х с]**), где:

τ	= напряжение сдвига	[Н/м ²]
dv	= изменение скорости	[м/с]
dy	= расстояние между слоями	[м]
dv/dy	= градиент скорости	[1/с]

Согласно распространенной практике **единицей динамической вязкости μ** является **мПа х с** или **Спз** (сантипуаз), где **1 Спз = 1 мПа х с = Па х с х 10⁻³**. Значения динамической вязкости различных жидкостей приведены в таблице ниже.

Тип жидкости	t° [°C]	μ [мПа х с]
Топливо	20	0,65÷0,70
Водопроводная вода	20	1
Оливковое масло	20	85
Кровь	37	4÷25
Глицерин	20	1 500
Мед	20	10 000
Сиропа	20	100 000

Другим характерным параметром любой жидкости является **кинематическая вязкость ν** , которая определяется соотношением между динамической вязкостью μ и плотностью жидкости ρ .

$$\nu = \mu/\rho \quad [\text{м}^2/\text{с}]$$

где: μ = динамическая вязкость [Н х с/м²]
 ρ = плотность [Н х с²/м⁴]

Этот параметр определяет сопротивление струи жидкости потоку под воздействием силы тяжести. Разумеется, этот параметр зависит от вязкости и плотности жидкости.

НЬЮТОНОВСКИЕ И НЕНЬЮТОНОВСКИЕ ЖИДКОСТИ

Жидкости, к которым применяется закон вязкости Ньютона, называются ньютоновскими (истинными) жидкостями. Динамическая вязкость таких жидкостей меняется с изменением значения температуры, но не зависит от напряжения сдвига или градиента скорости.

Типичными ньютоновскими жидкостями являются: **вода**, минеральное масло, глицерин и битумы. Так как рабочие характеристики погружного перемешивающего оборудования указываются для работы в **чистой воде**, то, соответственно, погружные мешалки определяются как оборудование, эксплуатируемое в ньютоновских жидкостях. Разумеется, физические характеристики перемешиваемых сточных вод будут определять типоразмер оборудования с точки зрения требуемой мощности электродвигателя, гидравлических компонентов, габаритов и т. д.

Жидкости, динамическая вязкость которых зависит от прилаемого напряжения сдвига, называются **неньютоновскими жидкостями**. Исходя из реологического поведения, неньютоновские жидкости разделяются на псевдопластичные, дилатантные, тиксотропные и реопектичные. Динамическая вязкость в этих случаях называется кажущейся вязкостью μ .

Наиболее часто используемой определяющей формулой является следующая степенная зависимость:

$$\mu = k \, (dv/dy)^{n-1}$$

где **k** – коэффициент консистенции, а **n** – индекс поведения потока.

Большинство неньютоновских жидкостей являются псевдопластичными, то есть жидкостями, вязкость которых снижается при приложении напряжения сдвига.

У псевдопластичных жидкостей индекс **n** **меньше 1**. Типичным примером является зубная паста. Под воздействием напряжения сдвига крупные твердые частицы в зубной пасте разбиваются на отдельные мелкие частицы, которые затем ориентируются в направлении потока. Это означает, что жидкость становится менее устойчивой к растеканию.

Вязкость **неньютоновских дилатантных жидкостей** при приложении напряжения сдвига повышается, а индекс **n** **больше 1**.

Типичными примерами **неньютоновских дилатантных жидкостей** являются обработанные осадки сточных вод, шламовые воды, песок и песок-плавун, частицы которых при напряжении сильно отталкиваются друг от друга. Это приводит к образованию пустот, в результате чего жидкость становится нетекучей. См. Рис. 26.

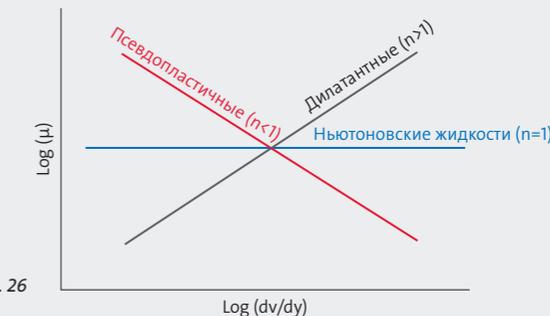
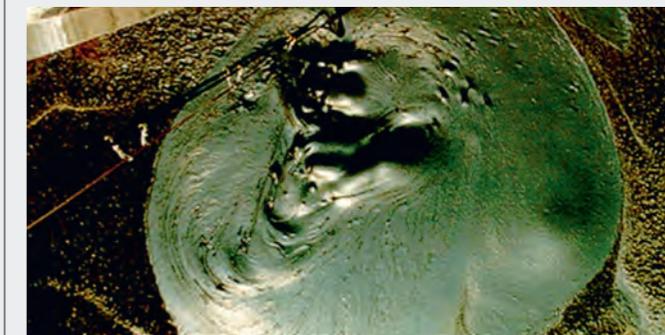


Рис. 26

В случае некоторых жидкостей, поведение вязкости зависит не только от текущей температуры и скорости сдвига, но и от ранее прилаемых скоростей сдвига и температур. Прилагаемая скорость сдвига изменяет структуру жидкостей, причем структура тиксотропных и реопектичных жидкостей не возвращается в исходное состояние, когда скорость сдвига уменьшается. В качестве примера тиксотропной жидкости можно привести йогурт. Жидкости, вязкость которых со временем увеличивается под воздействием постоянного напряжения сдвига, называются реопектичными.

В качестве примера можно привести гипсовое тесто и типографские краски.



ЧИСЛО РЕЙНОЛЬДСА И ЧИСЛО МОЩНОСТИ

Важными безразмерными величинами, которые необходимо учитывать при процессах перемешивания, являются число Рейнольдса и число мощности.

В 1883 году экспериментальным путем Рейнольдс вывел безразмерную величину, позволяющую определить, является ли поток ламинарным или турбулентным.

Рейнольдс использовал стеклянную трубку с регулируемым потоком воды, в который вводилась тонкая струйка краски (см. Рис. 27).

Когда струйка краски текла по трубке по прямой, то создавался поток, известный как ламинарный. Интенсивность потока постепенно увеличивалась, и в определенный момент поведение струи жидкости радикальным образом менялось. Ламинарное движение жидкости переходило в **неустойчившееся движение**, а затем становилось **турбулентным**.

Чтобы отобразить динамические характеристики данного эксперимента, Рейнольдс определил безразмерную величину через отношение сил инерции к силам вязкости. Это число R_e получило название число Рейнольдса

Число рассчитывается по формуле

$$R_e = \rho UL/\mu = UL/\nu$$

где:

- U = средняя скорость жидкости [м/с]
- μ = динамическая вязкость [Н × с/м²]
- ν = кинематическая вязкость [м²/с]
- ρ = плотность жидкости [Н × с²/м⁴]
- L = характеристическая длина [м]

В случае каналов с квадратным, прямоугольным и круглым сечением, высота которых сравнима с шириной, значение L определяется по формуле:

$$L = 4 \Omega/W$$

где:

Ω = площадь поперечного сечения

W = смоченный периметр (общая длина стенок, соприкасающихся с жидкостью)

Ω/W определяется как гидравлический диаметр. При наличии в трубе потока величина L равна диаметру D :

$$L = 4 \pi r^2 / 2 \pi r = 2 r = D$$

В случае потока в открытых каналах, которые подходят для работы мешалок и образвателей потока, значение гидравлического диаметра должно определяться как отношение между площадью поперечного сечения канала Ω и его смоченной поверхностью W .

$R_e \leq 2\,000$: **ламинарный поток**, при котором силы вязкости поддерживают ламинарность потока в трубе.

$2\,000 \leq R_e \leq 10\,000$: **переходный поток – переход ламинарного потока к турбулентному потоку**

$R_e \geq 10\,000$: **турбулентный поток**

В случае очистки сточных вод процессы перемешивания и создания потока являются процессами, происходящими в турбулентных условиях.

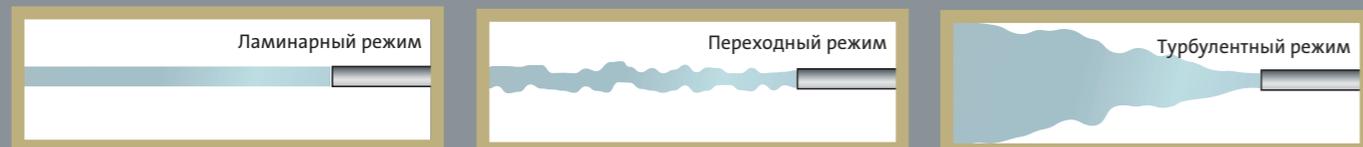
Так называемое число мощности (**число Ньютона**) определяется по формуле

$$N_p = P/\rho n^3 D^5$$

где:

- ρ = плотность жидкости [Н × с²/м⁴]
- P = мощность [кВт или Н × м/с]
- n = скорость вращения [1/с]
- D = диаметр рабочего колеса [м]

Рис. 27



Поскольку **критериями для проектирования пропеллера** мешалки являются такие параметры, как размер пропеллера D , частота вращения пропеллера и геометрические характеристики пропеллера (шаг лопастей, их количество и форма и т. д.), то вышеуказанное число мощности используется в целях **оптимизации пропеллеров мешалок с аналогичными геометрическими характеристиками**.

Как правило, числа мощности различных пропеллеров находятся в диапазоне от 0,3 до 1,35, в зависимости от режима гидравлического потока, т. е. от значения числа Рейнольдса. Число мощности у пропеллеров для погружных мешалок и образвателей потока, работающих в режиме турбулентного потока, находится в диапазоне от 0,3 до 0,35, при значении числа $R_e > 10\,000$.

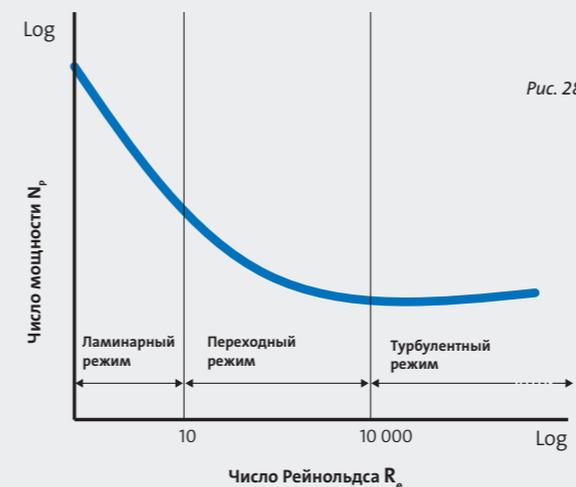


Рис. 28

Несколько десятилетий назад было установлено, что в случае систем с аналогичными геометрическими характеристиками число мощности зависит от числа Рейнольдса. Данная зависимость всесторонне изучена, и на сегодняшний день она остается важнейшим отношением, используемым при расчетах мощности пропеллера. Одна только эта зависимость критерия мощности от числа Рейнольдса устанавливает взаимосвязь между плотностью, вязкостью, частотой вращения и диаметром. Зависимость числа мощности от числа Рейнольдса была экспериментальным образом определена для множества типов пропеллеров. Эта зависимость показана на Рис. 28.

Число Рейнольдса помогает определить рабочий режим пропеллера и как следствие, спрогнозировать потребляемую мощность.

В режиме **турбулентного потока** преобладают силы инерции. В режиме ламинарного потока преобладают силы вязкости.

Между режимом турбулентного потока и режимом ламинарного потока существует зона, известная как **режим переходного потока**. Как предполагает сам термин «переходный», режим **переходного потока** – это такой режим, при котором поток с преобладанием сил инерции превращается в поток с преобладанием сил вязкости, поскольку вязкость увеличивается.

В **турбулентном потоке** для перемешивания жидкости требуется минимум энергии. В **ламинарном потоке** вязкость жидкостей увеличивается, и для перемешивания жидкости требуется дополнительная энергия.



ТРЕБОВАНИЯ ПО ОПТИМАЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КОНФИГУРАЦИИ

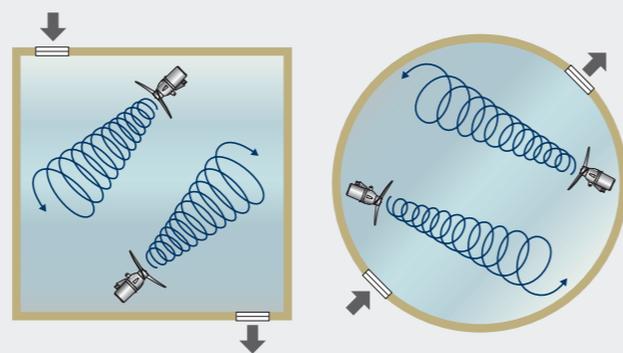
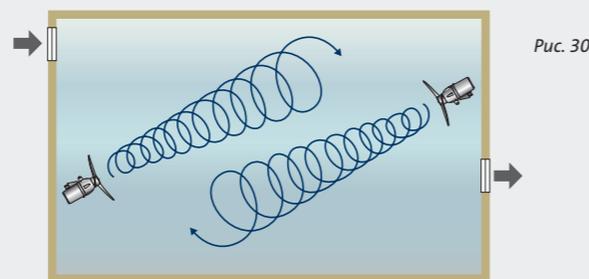
Гидродинамическая конфигурация, образуемая перемешивающим оборудованием, является результатом конструктивного решения пропеллера, геометрических характеристик резервуара, характеристик перемешиваемой жидкости и расположения оборудования для перемешивания.

Конструктивное решение пропеллера

Количество лопастей, профиль лопастей, шаг лопастей и частота вращения влияют на объем воды, перекачиваемой пропеллером, на индуцированный объем, и на формирование объемного потока.

Разработаны и выведены на рынок различные модели погружных мешалок с различным количеством лопастей и различными профилями лопастей. Некоторые модели представлены на Рис. 29.

Рис. 29



Геометрические характеристики резервуара и перемешиваемый объем

Геометрические характеристики резервуара могут существенно влиять на гидродинамическую конфигурацию. В частности, это касается наличия углов в **квадратных и прямоугольных резервуарах** (см. Рис. 30) или препятствий, например, колонн, которые являются опорой для крыши (в случае крытых резервуаров). Главным последствием является возникновение гидравлических потерь и, соответственно, потерь энергии, передаваемой от пропеллера к объему жидкости. Это может привести к повышенному потреблению энергии, необходимой для перемешивания.

Оптимальным резервуаром, с точки зрения гидродинамики, является цилиндрический резервуар заполненный перемешиваемой жидкостью примерно на $0,7 \times D$, где D – диаметр резервуара.

Однако, на практике, из-за риска образования центрального завихрения и существенной неравномерности распределения скоростей, может потребоваться установка перегородок, даже в том случае, если мешалка расположена правильно.

В случае использования резервуаров с замкнутым контуром (см. Рис. 31) на окончательную гидродинамическую конфигурацию существенно влияют такие факторы, как ширина канала, уровень воды в резервуаре, разнообразные формы отражательных перегородок и размещение перемешивающих устройств (образователей потока) в канале.

Характеристики перемешиваемой жидкости
Важнейшими характеристиками перемешиваемых жидкостей являются **концентрация твердых частиц и вязкость**. Эти факторы влияют на развитие струйного потока и окончательную гидродинамическую конфигурацию. Чем выше концентрация твердых веществ и вязкость, тем выше требуемая мощность устройства перемешивания. Кроме того, две жидкости с одинаковой концентрацией твердых частиц могут иметь совершенно разную вязкость.

Изменения вязкости при различной концентрации твердых частиц в активном иле показаны на схеме на Рис. 32.

При обработке сточных вод погружные мешалки обычно используются в жидкостях/шламах с концентрацией твердых частиц в диапазоне от 0,5% (или менее) и до 8%.

Расположение устройств для перемешивания

Правильное расположение оборудования для перемешивания в резервуаре является важнейшим условием итоговой оптимальной гидродинамической конфигурации, максимально сокращающей гидравлические потери. Необходимо в обязательном порядке соблюдать правила расположения перемешивающего оборудования. См. Раздел [2] настоящего руководства.

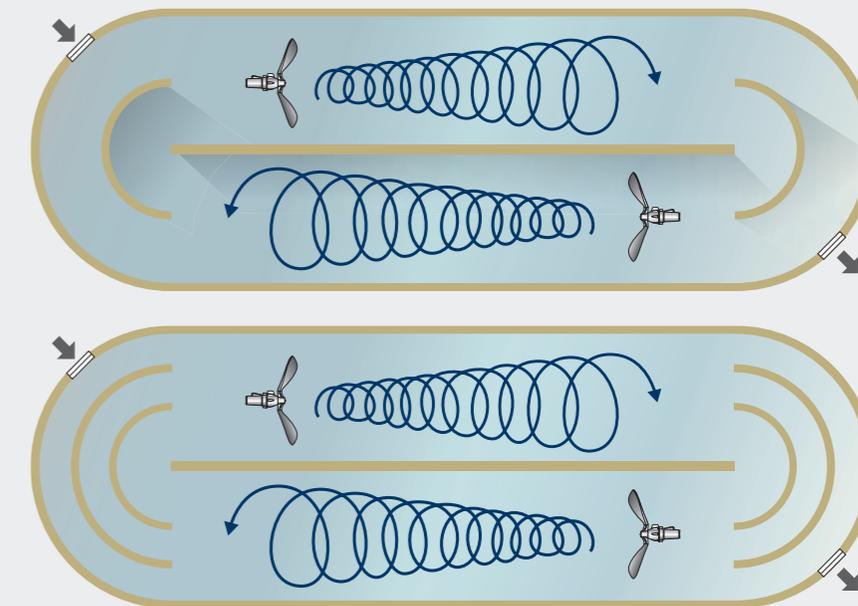
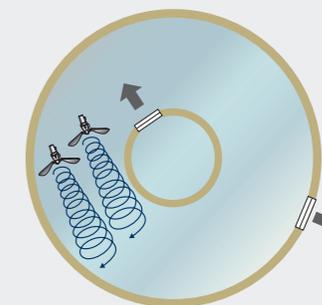


Рис. 31



Зависимость между концентрацией твердых частиц и вязкостью в активном иле



Рис. 32

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ГИДРОДИНАМИКА ДЛЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ¹⁾

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ГИДРОДИНАМИКА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОКА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

Вычислительная гидродинамика (англ. Computational fluid dynamics, CFD) – подраздел механики сплошных сред, включающий совокупность физических, математических и численных методов, предназначенных для вычисления характеристик потоковых процессов. Применяя компьютерные средства, можно смоделировать взаимодействия жидкостей с поверхностями, определяемые пограничными состояниями. CFD обеспечивает методы прогнозирования параметров потока, которые можно успешно применять для решения задач связанных с перемешиванием.

В случае особых и/или крупномасштабных проектов компания Grundfos при необходимости применяет CFD моделирование

в качестве вспомогательного технологического средства, позволяющего продемонстрировать заказчикам параметры потока перемешивания, обходясь без дорогостоящих и требующих больших затрат времени экспериментальных работ в реальных условиях.

Следовательно, для проверки результатов имитационного моделирования средствами CFD необходимо формировать экспериментальные данные в аналогичном масштабе. Это может быть сделано используя экспериментальный набор значений для измерений скорости потока в определенных точках. Данную задачу можно решить, например, при помощи лазерного анемометра, основанного на эффекте Доплера, который выполняет замер скорости потока во всех трех направлениях (по осям x, y и z). См. Рис. 33.

¹⁾ Ссылочная информация: Вычислительная гидродинамика (CFD) в области смешивания, Бруно Киллерих (Bruno Killerich), Инженер-проектировщик, Grundfos CMA



Рис. 33 Измерение скорости потока, выполняемое в реальных производственных условиях на станции водоочистки

В тех случаях, когда выполнение экспериментальных работ невозможно, при анализе результатов CFD есть возможность опираться на предыдущий опыт, выполнять сравнение с аналитическими решениями, либо рассматривать потоки с более простыми параметрами, или же выполнять сравнение с высококачественными данными, полученными при решении похожих проблем.

Пользователь программного обеспечения CFD должен иметь возможность прибегать к упрощениям, чтобы сократить время на вычисления. Но для получения точных и достоверных результатов необходимо максимально учитывать всю специфику конкретного применения.

Моделирование средствами CFD можно выполнять путем моделирования либо установившегося, либо переходного режима (см. Рис. 34 и 35 соответственно). Выбор конкретного метода определяется конкретной изучаемой областью применения. На самом деле, устойчивым состоянием характеризуется далеко не все поля течения. Но из практических соображений, чтобы сократить время вычислений, это допущение часто используется в процессе моделирования.

В качестве примера такого допущения можно привести горизонтальный поток в резервуарах с замкнутым контуром, который находится в полу-установившемся состоянии, и общий характер потока можно примерно определить как устойчивый.

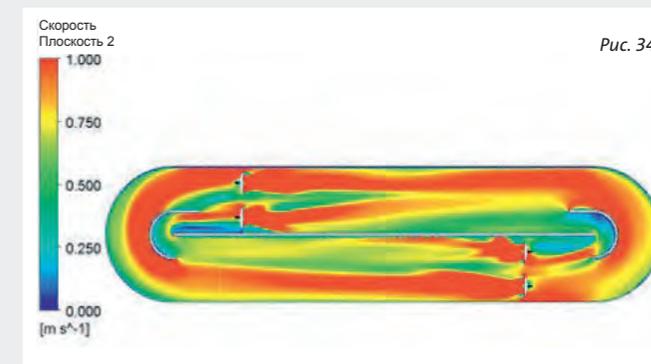


Рис. 34

Рис. 34:

Моделирование устойчивого состояния фиксирует только мгновенное состояние поля потока в резервуаре. Если остальные расчеты станут стабильными при расчетах отдельных уравнений, то можно визуализировать решение для установившегося состояния.

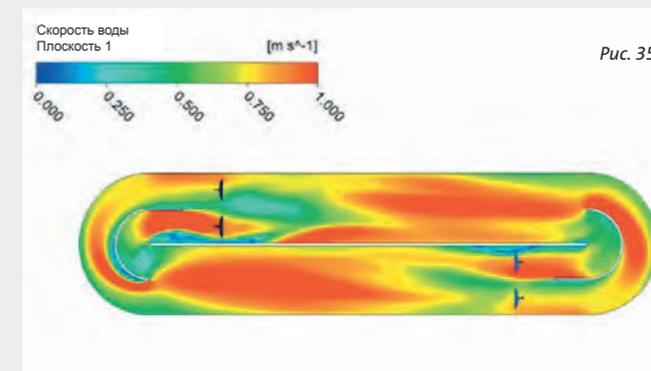
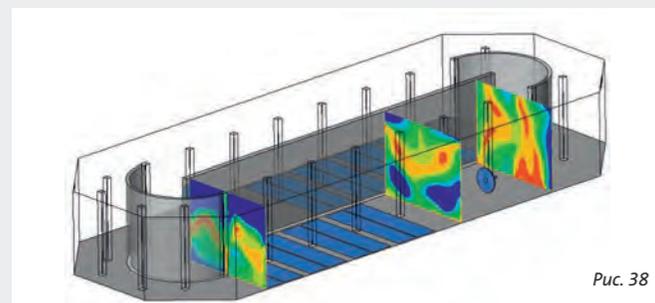
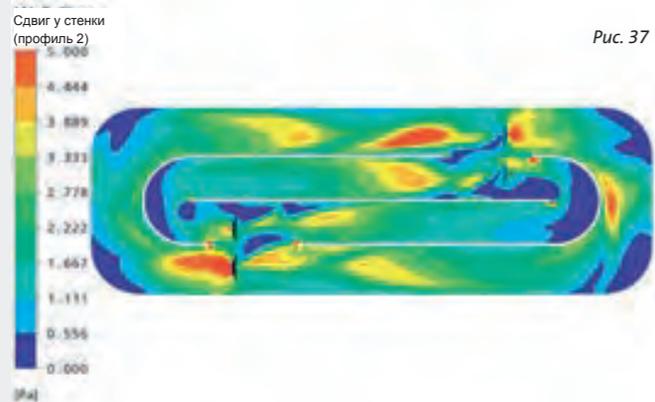
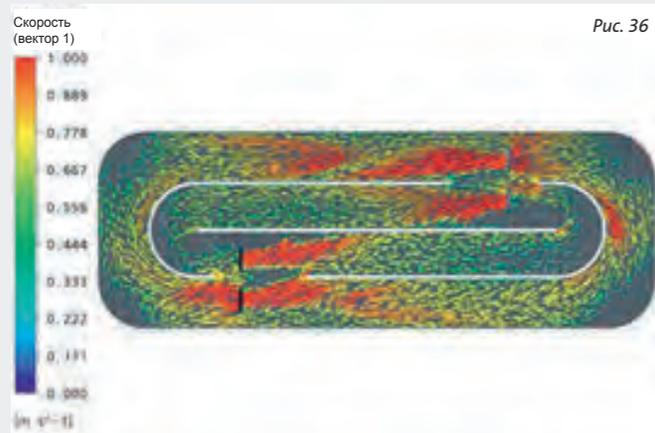


Рис. 35

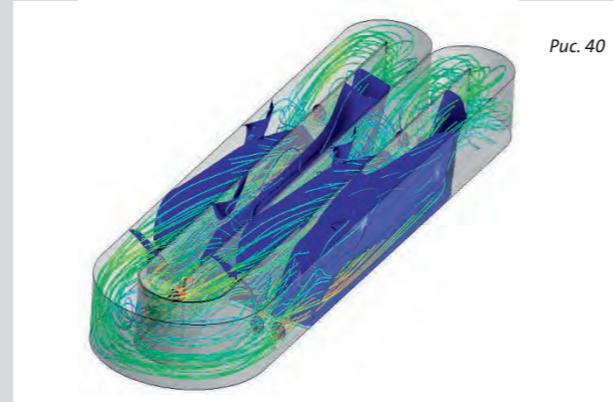
Рис. 35:

Моделирование переходного состояния визуализирует поле потока в резервуаре за определенный период времени. Этот метод используется в том случае, когда невозможно найти решение для установившегося состояния, или же когда есть время на вычисления, причем приближенное к практике. На Рис. 35 показан фиксированный момент на динамическом представлении переходного состояния.

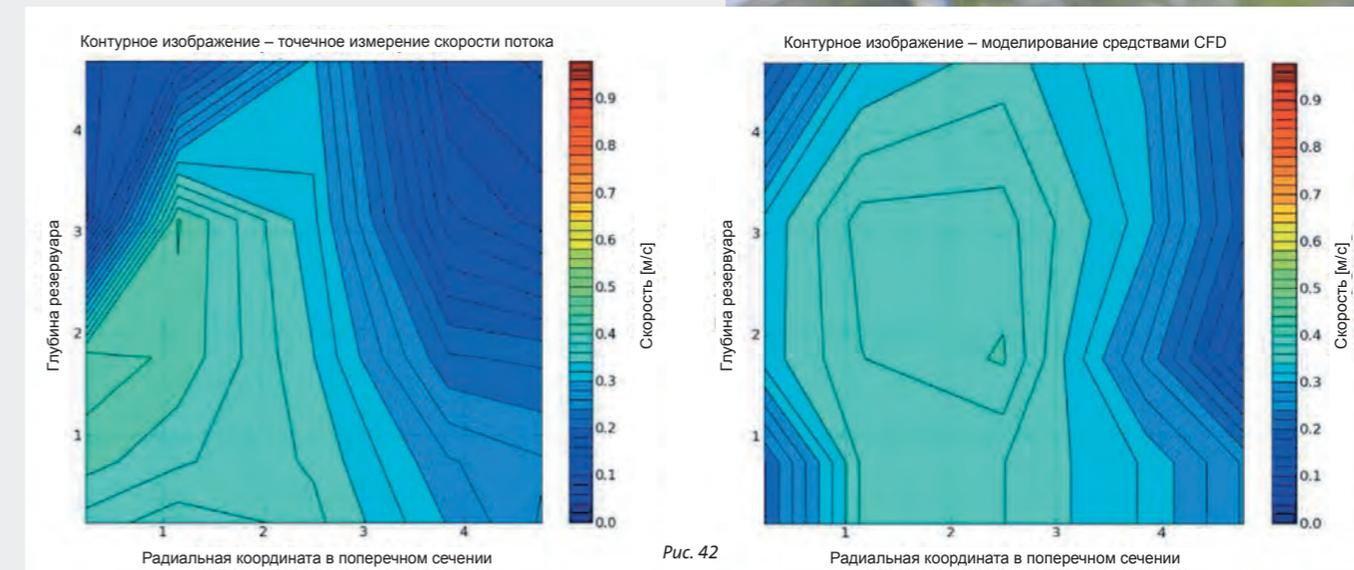
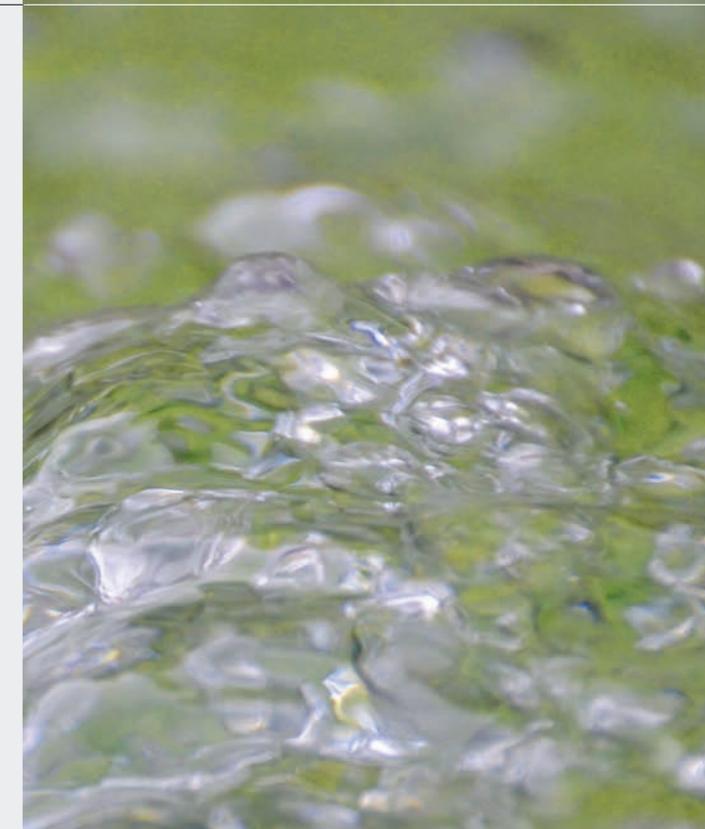
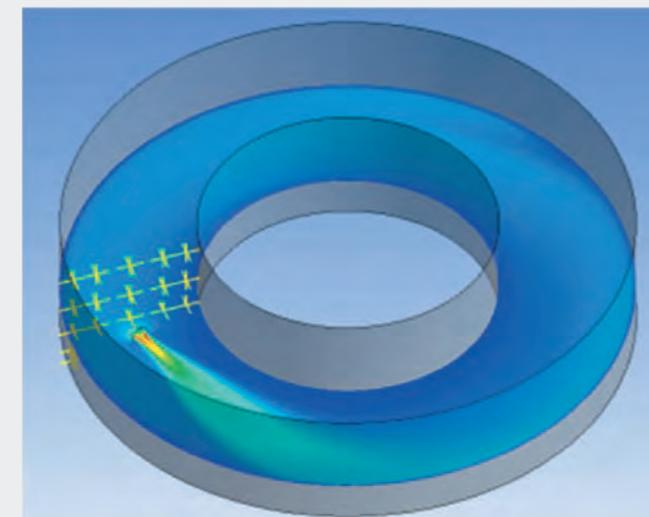
Применение программного обеспечения CFD позволяет визуализировать полученные результаты в двухмерном пространстве посредством изображений вектора скорости (см. Рис. 36) или, например, профили скорости (Рис. 37) в различных поперечных сечениях резервуара (Рис. 38). Можно также оценивать давление, вариации напряжения сдвига и т. д.



Кроме того, можно визуализировать векторы скорости / линии потока в 3D, визуализируя общий поток в резервуаре. См. Рис. 39 и 40.



Создав модель при помощи CFD, можно изучить экспериментальные результаты измерений скорости. В случае поперечного сечения, показанного на Рис. 41, на Рис. 42 дано сравнение контурного изображения, полученного при помощи точечных измерений, и результатов анализа, выполненного при помощи CFD.



КОНСТРУИРОВАНИЕ МЕШАЛОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

В процессе конструирования мешалок компания Grundfos учитывает основные факторы и характеристики мешалки.

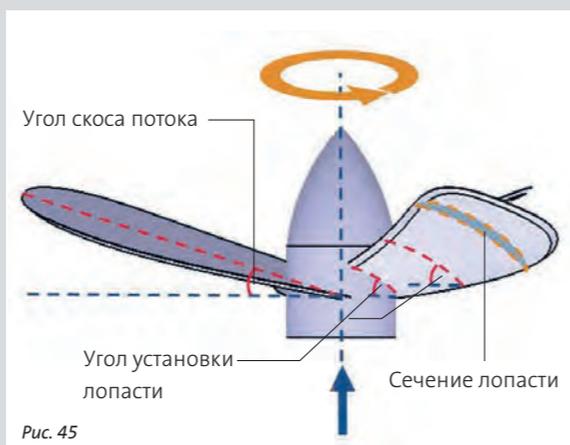
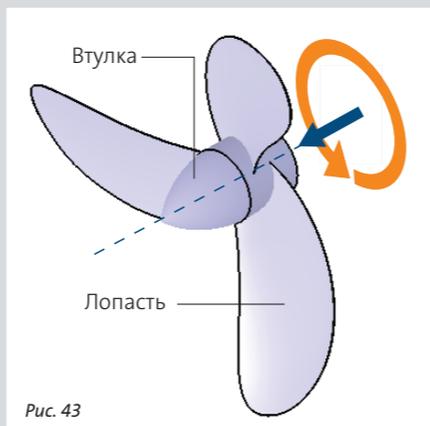
К основным факторам относятся:

- КПД, выраженный как отношение осевого усилия к потребляемой мощности
- Эксплуатационная надежность, позволяющая избежать повреждений из-за химических/физических характеристик сточных вод
- Способность к самоочищению, что предотвращает блокировку пропеллера из-за наличия длинных волокон
- Простота конструкции, обеспечивающая возможность массового производства

Учитывается также большой перечень основных характеристик (см. Рис. 43, 44 и 45), например:

- Шаг (угол установки лопасти)
- Линия скоса лопасти
- Отклонение лопасти (угол отклонения лопасти по отношению к оси втулки)
- Геометрия сечения лопасти, основание лопасти, край лопасти
- Геометрия передней и задней кромки лопасти
- Аспектное соотношение
- Количество лопастей
- Толщина лопастей
- Форма втулки
- Шероховатость поверхности
- Скорость вращения
- Окружная скорость конца лопасти

Прогнозирование эксплуатационных характеристик мешалки опытным путем или другими методами – это сложный процесс, требующий больших затрат времени. Используя CFD, как это делает компания Grundfos, можно найти более целесообразное решение для конструктивного исполнения мешалки, затратив на это меньше времени.



Далее на технологической схеме (см. Рис. 46) показан общий технологический процесс конструирования мешалок, позволяющий сократить время на испытания без ущерба для проверенных результатов.

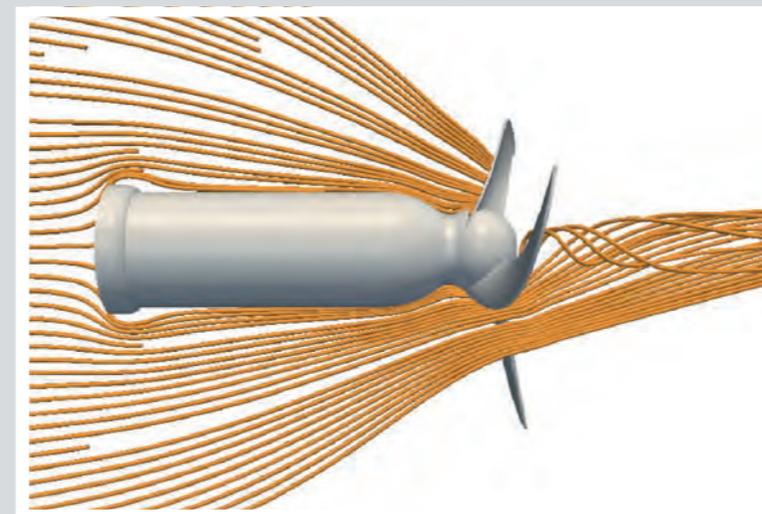


Рис. 46

Следующий пример показывает, как применение моделирования CFD позволяет улучшить конструктивное исполнение мешалки. Необходимо внести изменения в изначальную конструкцию мешалки (см. Рис. 47), энергоэффективность которой, т. е. соотношение осевого усилия к потребляемой мощности, составляет 0,320 Н/Вт.

После того как конструкция пропеллера была оптимизирована при помощи CFD, пропеллер стал выглядеть следующим образом (см. Рис. 48), а его энергоэффективность увеличилась до 0,350 Н/Вт (см. Таблицу 1).



Рис. 47 Изначальная конструкция мешалки

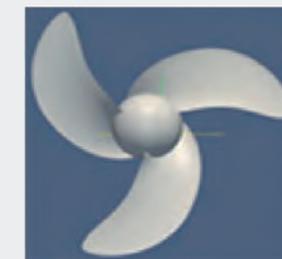


Рис. 48. Конструкция, оптимизированная средствами CFD

Результаты моделирования средствами CFD	Осевое усилие [Н]	P_{in} [кВт]	R_p [Н/Вт]
Изначальная конструкция мешалки	1545	4,8	0,32
Конструкция, оптимизированная средствами CFD	1611	4,6	0,35

Таблица 1

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CFD ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОКА

Мы убедились, насколько моделирование средствами CFD удобно для получения данных по характеристикам потока в различных областях применения процесса перемешивания. На Рис. 49 в качестве примера показаны три различных решения, полученных с применением методов CFD:

А, В и С в горизонтальной плоскости, проходящей через центр мешалки. Очевидно, что результаты, которые демонстрирует решение С, значительно лучше, чем результаты решений А и В.

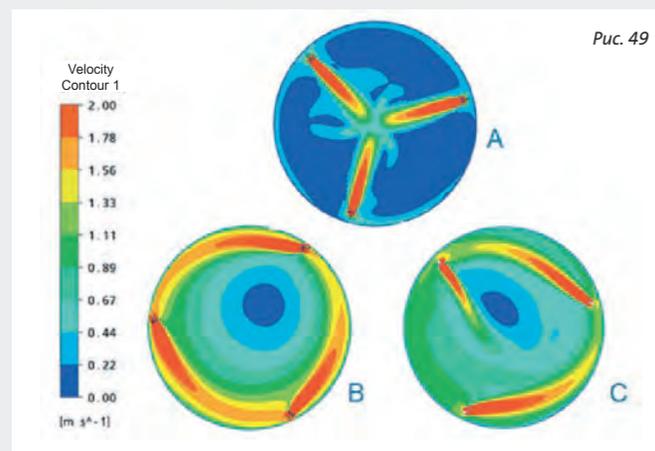


Рис. 49

Использование программного обеспечения для CFD моделирования позволяет визуализировать полученные результаты при помощи построений вектора скорости (см. Рис. 50), профиля скорости (Рис. 51) в различных поперечных сечениях резервуара, напряжения сдвига у дна и линии тока в 3D, визуализируя тем самым характер движения потока в резервуаре (Рис. 52 и 53).

Кроме того, компания Grundfos выполняет моделирование средствами CFD для того, чтобы изучить применение своего оборудования в различных технологических процессах и системах, используемых на очистных сооружениях водоотведения, например, в системах аэрации, эжекторных насосах, насосах в составе насосных станций и т. д., а также влияние наличия частиц (см. Рис. 54). Прибегая к моделированию средствами CFD в более сложных ситуациях, компания Grundfos может помочь своим клиентам оптимизировать конструкцию и избежать дорогостоящих ошибок, то есть помочь в той области, в которой компания накопила значительный опыт и экспертные знания.

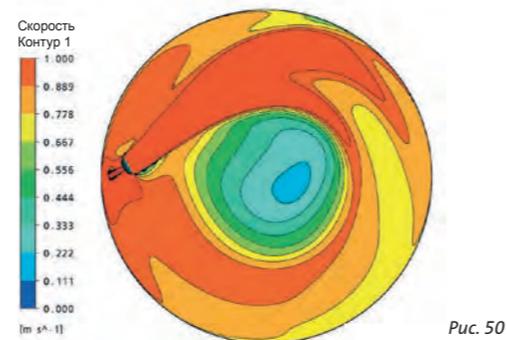


Рис. 50

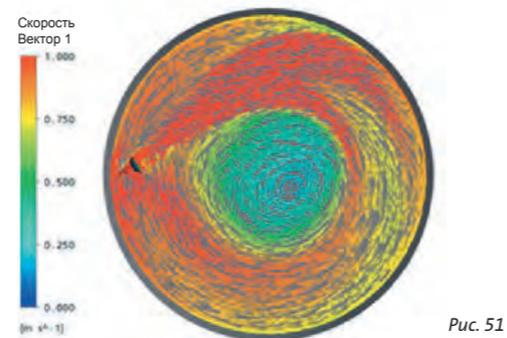


Рис. 51

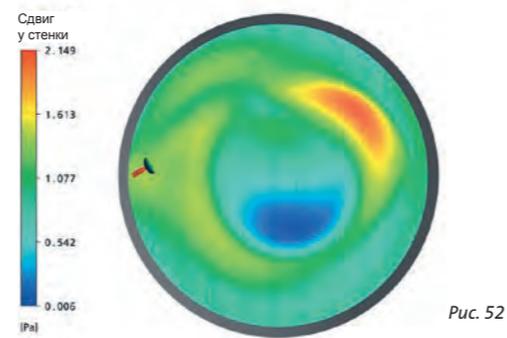


Рис. 52

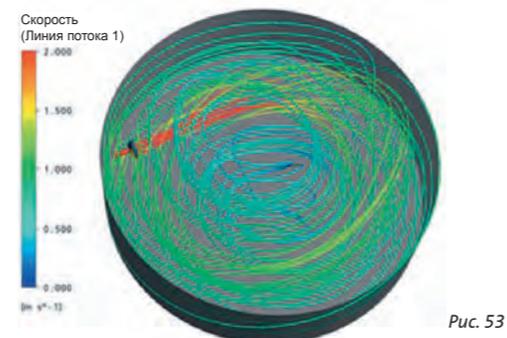


Рис. 53

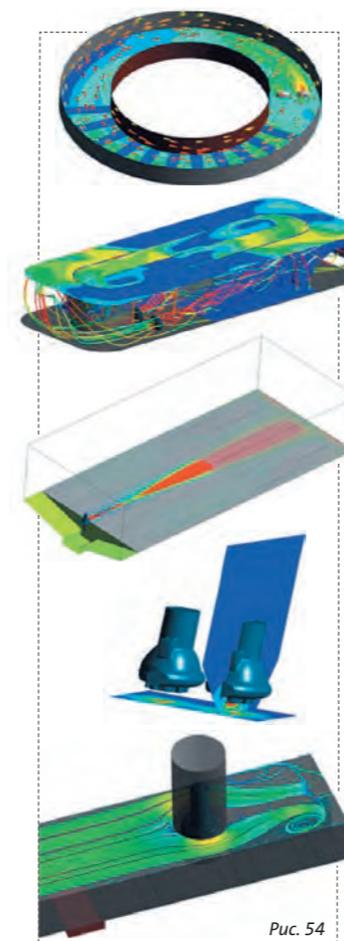


Рис. 54

КОМПАНИЯ GRUNDFOS ИСПОЛЬЗУЕТ CFD МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ СВОЕГО ОБОРУДОВАНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ ВОДООТВЕДЕНИЯ

ОБРАЗОВАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСЕВОГО УСИЛИЯ Различия в распределении потока, зависящие от перемешивающего оборудования

Распределение потока, созданного погружными мешалками и образователями потока, дает различные результаты вследствие различных характеристик перемешивающего оборудования.

Погружные мешалки работают при высокой и средней частоте вращения (от 1410 до 250 об/мин), вызывающей высокое напряжение сдвига и относительно низкий расход, в то время как образователи потока работают при значительно меньшей частоте вращения (≤ 100 об/мин), вызывающей малое напряжение сдвига и существенно больший расход.

На Рис. 55 и 56 показаны профили скоростей на двух переходных стадиях, построенные средствами CFD, для резервуара длиной 78 м, шириной 9 м и уровнем воды в резервуаре равном 5 м, в котором установлены пять погружных мешалок Grundfos модели AMG 30.64.336.

Предположим, что в таком же резервуаре установлены три образователя потока Grundfos модели AFG 37.180. На Рис. 57 и 58 показаны профили скоростей на двух переходных стадиях, построенные средствами CFD. Как видно, во втором случае присутствует гораздо меньше придонных зон с низкой скоростью потока. Более того, применение образователей потока позволяет существенно сократить энергопотребление.

Для создания значительного осевого усилия мощность электродвигателя погружной мешалки должна быть значительно больше, чем мощность электродвигателя образователя потока. Это означает, что отношение осевого усилия к потребляемой мощности R_{FP} у образователей потока выше, чем у погружных мешалок.

Хотя использование образователей потока кажется более привлекательным решением с точки зрения энергосбережения, но с точки зрения капитальных затрат образователи потока менее выгодны. До того как сделать окончательный выбор, рекомендуется оценить срок окупаемости, учитывая и сравнивая такие параметры, как энергосбережение и стоимость технического обслуживания.

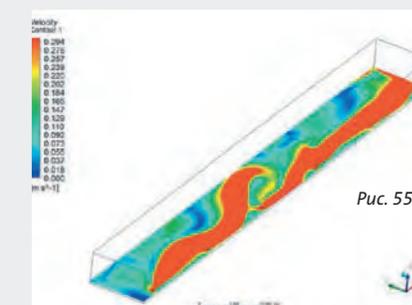


Рис. 55

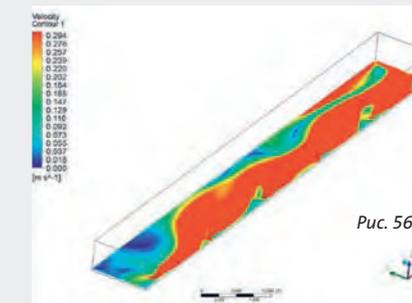


Рис. 56

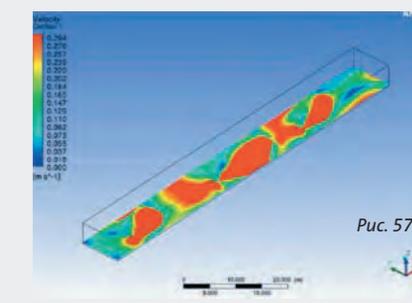


Рис. 57

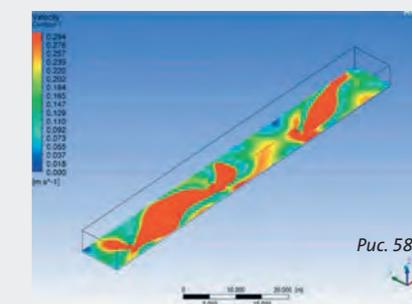


Рис. 58

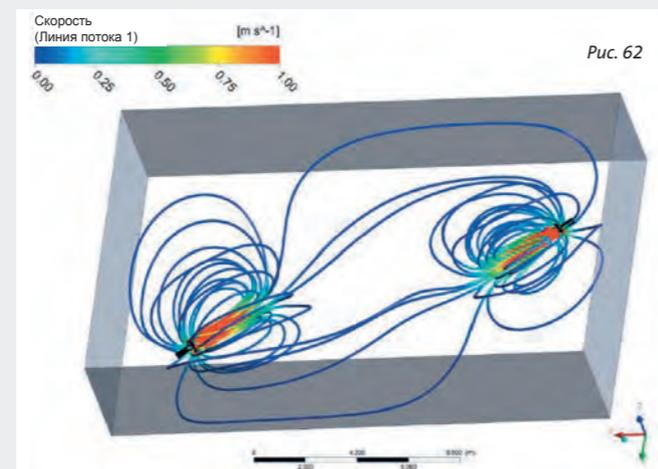
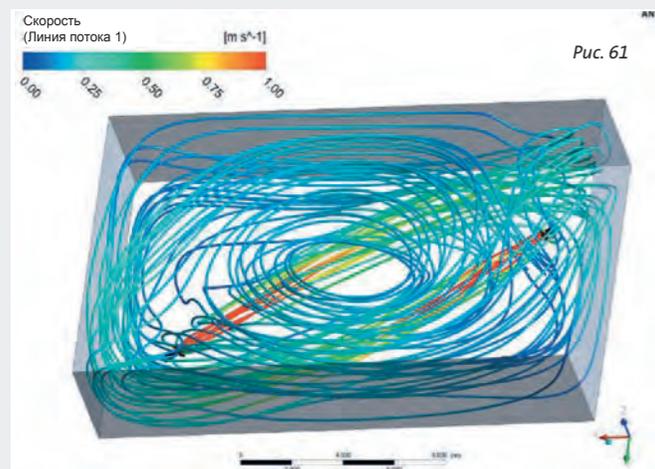
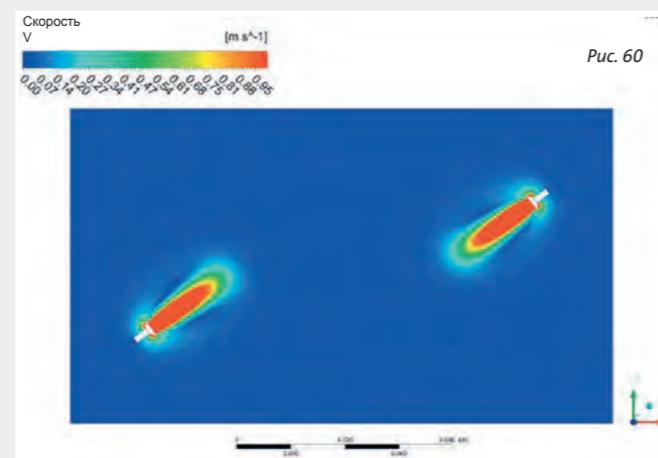
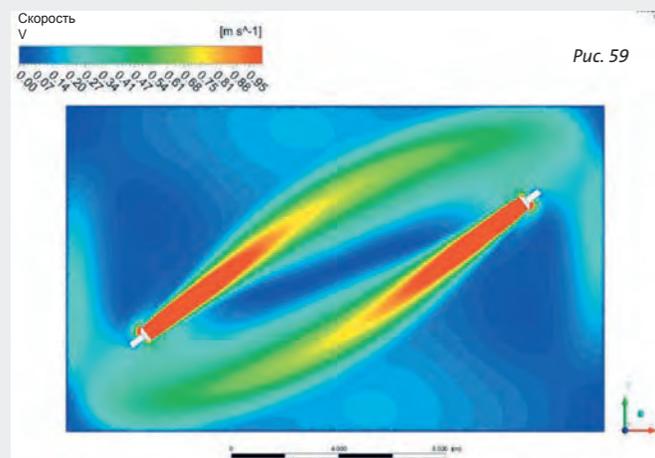
Различия в распределении потока, зависящие от перемешиваемой среды

Распределение потока, созданного аналогичными погружными мешалками, в резервуарах одинаковой геометрии, но заполненных сточной водой с разной концентрацией твердых включений **TS%** – отличается. Чем выше концентрация твердых частиц, тем выше напряжение сдвига, необходимое для приведения в движение объема жидкости, и тем выше потребное осевое усилие.

На рисунках далее показано распределение скоростей в устойчивом состоянии и линии тока по оси мешалки, визуализи-

рованные средствами CFD для наполненного сточной водой резервуара длиной 20 м, шириной 12 м и уровнем воды 4,5 м, в котором должны работать две погружные мешалки Grundfos модели AMG 30.64.336. Концентрация твердых частиц **TS=1%** (см. Рис. 59 и 61) и 5,5% соответственно (см. рис. 60 и 62).

Результаты CFD моделирования ясно показывают, что процентная концентрация твердых частиц в перемешиваемой среде **TS%** влияет на значение потребного напряжения сдвига и осевого усилия.



[2]

РЕКОМЕНДАЦИИ И ПРАВИЛА

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕШАЛОК И ОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОТОКА

Выбор перемешивающего оборудования: важнейшие аспекты

Правильный выбор мешалок и образователей потока требует сбора данных и информации в соответствии с теми процессами перемешивания, которые будут задействованы. Оптимальный выбор перемешивающего оборудования возможен только при условии полного набора данных.

ЗАЧЕМ НУЖНО ПЕРЕМЕШИВАНИЕ?

Знание цели перемешивания может существенно упростить выбор типа оборудования, а также обеспечить его правильное расположение в резервуаре.

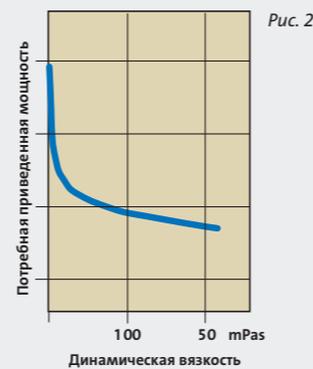
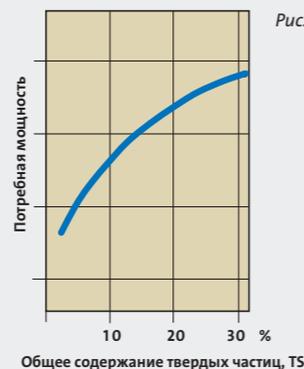
Типичным примером является процесс денитрификации, требующий деликатного перемешивания, то есть перемешивания без образования турбулентности на поверхности воды, а также такого расположения оборудования, при котором обеспечивается оптимальный «захват» поступающей сточной воды и создание рециркуляционных потоков.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕМЕШИВАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

В различных областях применения процессов смешивания, под характеристиками перемешиваемой жидкости понимаются следующие параметры:

ОБЩЕЕ СОДЕРЖАНИЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ИЛИ КОНЦЕНТРАЦИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ, ВЫРАЖЕННАЯ В ПРОЦЕНТАХ

Это значение весьма важно при использовании определенного инструмента подбора для обеспечения правильного выбора мешалки/образователя потока, осевое усилие которых достаточно для поддержания твердых частиц в суспендированном (взвешенном) состоянии. Компания Grundfos рекомендует, чтобы общее содержание твердых веществ **TS%** составляло до 8% в случае мешалок и до 1,5% в случае образователей потока. Значение концентрации твердых частиц будет влиять на потребляемую мощность. См. Рис. 1.



Максимальная температура сточной воды

Температурный диапазон среды, в которой работают мешалки и образователи потока Grundfos, составляет от 5 до 40 °С.

Максимальная динамическая вязкость сточных вод

Мешалки и образователи потока Grundfos работают при значении $\mu \leq 500$ мПа·с. Значение динамической вязкости будет влиять на потребляемую мощность. См. Рис. 2.

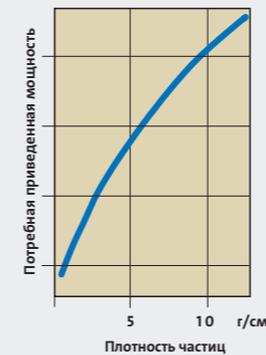


Рис. 3

Плотность сточной воды

При выборе мешалок и образователей потока Grundfos учитывается номинальное значение плотности воды $\rho_{\text{max}} = 1060$ кг/м³. Значение плотности воды будет соотноситься с плотностью частиц, а плотность частиц, в свою очередь, будет влиять на значение потребляемой мощности. См. Рис. 3.

pH сточных вод

Мешалки и образователи потока Grundfos работают при значении pH в диапазоне от 4 до 10.

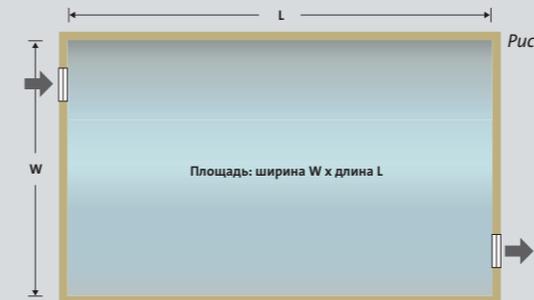


Рис. 4

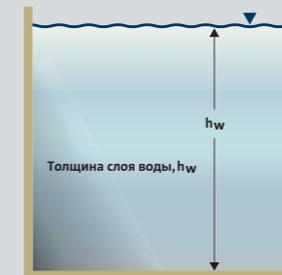


Рис. 5



Рис. 6



ФОРМА РЕЗЕРВУАРА

Форма резервуара может быть разной: квадратной, прямоугольной, круглой или резервуар с замкнутым контуром. Необходимо знать следующие важнейшие параметры резервуара:

- Внутренние размеры резервуара
- Размеры и расположение наклонных поверхностей у дна (если есть)
- Наличие в резервуаре препятствий для перемешивания струйных потоков, а также колонн (в случае крытых резервуаров) и т. д.
- Максимальный и минимальный уровень воды в резервуаре
- Высота внешних стенок резервуара

См. Рис. 4, 5, 6, 7 и 8.



Рис. 7

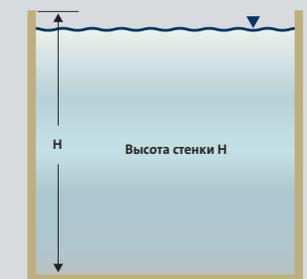
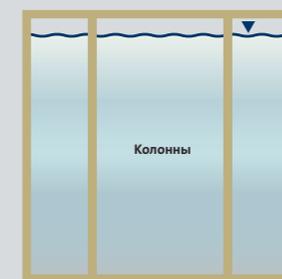


Рис. 8

НАЛИЧИЕ СИСТЕМ АЭРАЦИИ

Следует проверить возможное наличие аэрационных систем, работающих при избыточном и нормальном давлении, а также их количество и расположение в резервуаре. Это позволит исключить взаимное повреждение мешалок и аэрационного оборудования, а также любое негативное влияние струйного потока на процесс переноса кислорода. См. Рис. 9, на котором изображен резервуар с мелкопузырчатой системой аэрации.

МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ ТОЧЕК ВХОДА И ВЫХОДА ЖИДКОСТИ В РЕЗЕРВУАРЕ

Чтобы обеспечить правильное расположение оборудования в резервуарах всех типов необходимо знать, где в резервуаре осуществляется подвод и отвод жидкости. Если в резервуаре имеется не одно, а несколько подводов жидкости (например, для сточной воды, рециркуляции активного ила, рециркуляции перемешанной жидкости), то нужно точно знать, где они расположены. Кроме того, необходимо выяснить конструкцию подводящих и отводящих устройств. Например, если приток/отток жидкости происходит через перегородку с отверстиями, расположенными ниже уровня воды или в придонной части, то это может повлиять на расположение мешалок и образвателей потока. См. Рис. 10 и 11.

ДОСТУПНОСТЬ БАКА ДЛЯ УСТАНОВКИ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Определяя расположение перемешивающего оборудования, необходимо также иметь в виду, что при установке мешалок и образвателей потока могут возникнуть проблемы, связанные с доступом к резервуару. Особенно это касается ситуаций с заменой уже существующего перемешивающего оборудования. Требуется заранее проверить уже имеющиеся рабочие мостки и платформы, а также возможность доступа к резервуару для проведения монтажных работ.

ВЫБОР ПОДХОДЯЩЕГО ТИПА ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Все сведения, указанные выше, а также понимание процесса очистки сточных вод, на котором задействованы мешалки и образватели потока, позволяют правильно выбрать подходящий тип перемешивающего оборудования с высокой, средней или малой частотой вращения.

Цели перемешивания и примеры областей применения

ПЕРЕМЕШИВАНИЕ, СУСПЕНДИРОВАНИЕ И ГОМОГЕНИЗАЦИЯ

Основные процессы перемешивания на очистных сооружениях предполагают перемешивание жидкости с жидкостью или жидкости с твердыми частицами, поддержание твердых частиц во взвешенном состоянии без осаждения на дно резервуара, а также достижение максимальной степени гомогенизации, что означает максимально возможное однородное распределение компонентов смеси в объеме жидкости, участвующей в технологическом процессе.

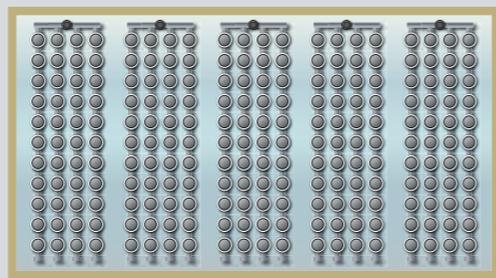


Рис. 9



Рис. 10



Рис. 11



В целом, процесс оседания (седиментации) твердых частиц описывается следующим образом:

Свободное осаждение

Осаждение считается свободным, если процентная концентрация твердых частиц $TS\%$ ниже 30-40%, поскольку в этом случае осаждение частиц в резервуаре происходит без интенсивного столкновения частиц друг с другом. Процесс перемешивания и соответствующее оборудование будут спроектированы для взвешенного состояния частиц. Это касается основных процессов на технологических этапах с участием активного ила. Приводятся различные значения степени суспендирования твердых частиц ($Sdeg$).

Стесненное осаждение

Когда концентрация твердых частиц составляет примерно 50%, осаждение считается стесненным, поскольку сталкивающиеся друг с другом частицы увеличивают время осаждения. Граница между уровнями варьируется в зависимости от размера частиц и их формы. К смесям жидкостей и частиц, характеризующимся стесненным осаждением, относятся густые осадки сточных вод и шлам. Их можно рассматривать как жидкости с особыми реологическими характеристиками, например, обладающие псевдопластичностью (обладающие тиксотропными свойствами).

В случае низких и увеличивающихся концентраций твердых частиц, потребляемая мощность, необходимая для приведения во взвешенное состояние, возрастает практически линейно. Когда концентрация составляет примерно 50%, то происходит переход от свободного осаждения к стесненному. Потребная мощность снижается в зависимости от количества частиц в смеси, которые сталкиваются между собой и замедляют скорость осаждения. С увеличением количества частиц потребляемая мощность снова увеличивается в результате увеличения скорости и плотности (см. Рис. 12)



Рис. 12

Как правило, различают три степени суспендирования ($Sdeg$):

Степень 1 ($Sdeg 1$)

Часть твердых частиц находится во взвешенном состоянии. Уровень гомогенизации смеси не превышает 30%. См. Рис. 13.

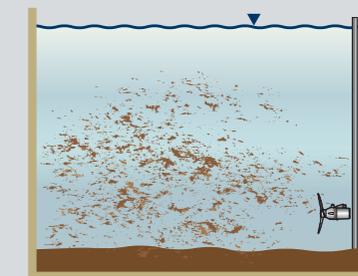


Рис. 13

Степень 2 ($Sdeg 2$)

Все частицы находятся во взвешенном состоянии. См. Рис. 14.

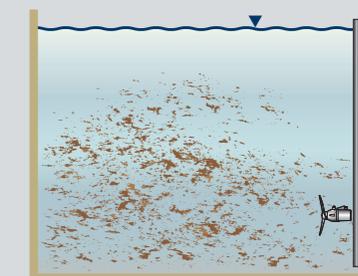


Рис. 14

Степень 3 ($Sdeg 3$)

Суспензия является однородной, а уровень гомогенизации может превышать 90%. См. Рис. 15.

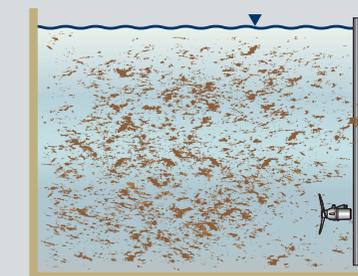


Рис. 15

Потребляемая мощность, необходимая для получения **Sdeg 3**, в два раза превышает потребляемую мощность, необходимую для получения **Sdeg 2**, и в пять (или более) раз превышает мощность, необходимую для получения **Sdeg 1**. См. Рис. 16.

Гомогенизировать смесь до уровня выше, чем **Sdeg 3**, нецелесообразно, поскольку для того чтобы несущественно повысить степень гомогенизации смеси, потребуется значительная мощность.

Для процессов перемешивания при очистке сточных вод достаточной степенью суспендирования является степень между **Sdeg 2** и **Sdeg 3**.

При различной степени взвешенности 1, 2 или 3, потребляемая мощность может быть определена как функция скорости осаждения частиц, выраженная в [м/мин]. При одинаковой скорости осаждения потребляемая мощность должна быть в три раза больше для перехода от степени суспендирования **Sdeg 1** до степени суспендирования **Sdeg 2** и в три раза больше для перехода от степени суспендирования **Sdeg 2** до степени суспендирования **Sdeg 3**. См. Рис. 17.

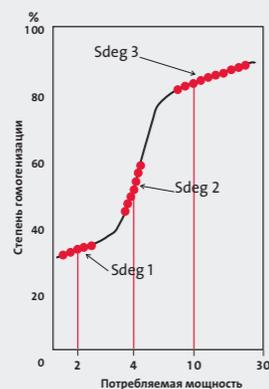


Рис. 16

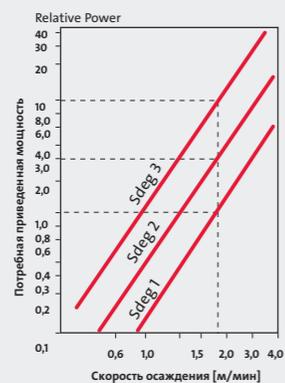


Рис. 17

Цель перемешивания в данном случае заключается в том, чтобы поднять частицы со дна резервуара и удерживать их во взвешенном состоянии, то есть не допустить осаждения частиц.

УСРЕДНИТЕЛЬНЫЙ РЕЗЕРВУАР

Типичным случаем применения такого процесса перемешивания является *усреднительный резервуар*.

Усреднительный резервуар используется на очистных сооружениях для усреднения стоков по качественному составу на стадии биологической очистки. Данный резервуар обеспечивает временное хранение суточного объема стоков, а также позволяет принять залповый сброс в дождливую погоду. Усреднительный резервуар может использоваться для размещения поступающих сточных вод на период работ по техническому обслуживанию на очистных сооружениях, а также для разбавления и распределения партий сбрасываемых токсичных или высококонцентрированных стоков (например, промышленных сточных вод), которые в противном случае будут препятствовать процессу биологической очистки.

Соответственно, резервуар и происходящий в нем процесс регулируются, т. е. усреднения стоков по качественному составу, характеризуются следующими параметрами:

- Изменяемый уровень воды в резервуаре
- Требования по обеспечению высокой степени гомогенизации
- Предотвращение осаждения твердых частиц, т. е. поддержание частиц во взвешенном состоянии
- Хорошее разжижение посредством эффективного перемешивания

Все эти цели достигаются за счет установки погружных мешалок и образателей потока, которые размещаются в вертикальной плоскости с учетом максимального и минимального уровня воды в резервуаре и ориентируются в соответствии с расположением точек входа и выхода жидкости в резервуаре. См. Рис. 18, 19 и 20.

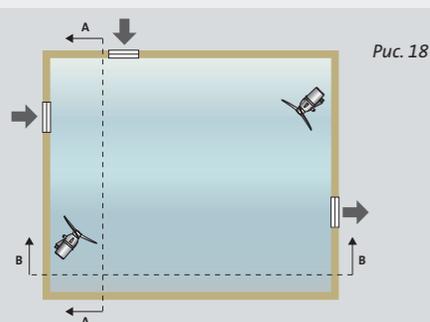


Рис. 18

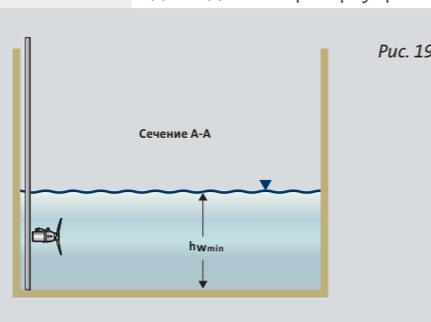


Рис. 19

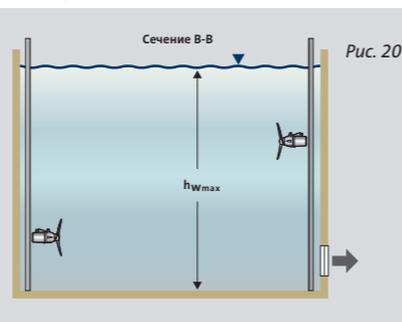


Рис. 20

БИОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ (дефосфатация, денитрификация, нитрификация)

Важнейшими областями применения перемешивающего оборудования на очистных сооружениях являются биохимические процессы, такие как дефосфатация (**EBPR**, процесс биологического удаления фосфора), денитрификация и нитрификация. Когда очистка сточных вод включает в себя удаление биогенных элементов (например, когда осуществляется только процесс денитрификации или же процесс денитрификации в совокупности с процессом дефосфатации, то в резервуар поступают различные технологические потоки).

В случае процесса денитрификации (так называемый процесс **DN-N**) в резервуар денитрификации, расположенный в технологической цепочке до резервуара нитрификации, поступают три различных потока (см. Рис. 21):

- Поток сточных вод с этапа механической очистки (WW)
- Поток возвратного активного ила (RAS) из резервуара вторичного осаждения
- Рециркуляционный поток иловой смеси (MLR), т. е. поток нитратов из резервуара нитрификации

При комплексном процессе денитрификации и дефосфатации (так называемый процесс **A2O**) после резервуара дефосфатации (анаэробный процесс) следует резервуар денитрификации (аноксидный, т. е. бескислородный процесс), а затем – резервуар нитрификации (аэробный процесс). См. Рис. 22.

В резервуар дефосфатации поступают два потока: поток сточных вод с этапа механической очистки и поток возвратного активного ила (RAS), а два других потока – поток сточных вод из резервуара дефосфатации и нитраты, полученные в резервуаре нитрификации, поступают в резервуар денитрификации. Рециркуляция этих потоков обычно называется внутренней рециркуляцией иловой смеси (MLR).

Рекомендуется устанавливать и направлять выбранные мешалки или образатели потока таким образом, чтобы их струйный поток захватывал три (или два) поступающих технологических потока и обеспечивал их интенсивное перемешивание. См. Рис. 21 (процессы **DN-N**) и Рис. 22 (процессы **A2O**).

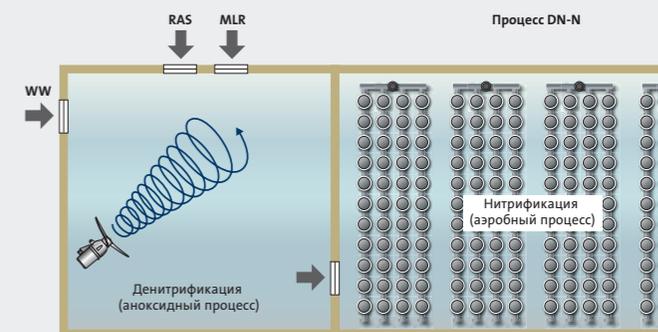


Рис. 21



Рис. 22

Процесс DN-N в одном и том же резервуаре

Что касается применения мешалок и образвателей потока для процесса нитрификации, необходимо рассмотреть две конкретные ситуации:

- Процесс DN-N в одном и том же резервуаре: попеременные процессы аэрации и перемешивания
- Процесс DN-N в одном и том же резервуаре: одновременные процессы аэрации и перемешивания

В попеременном режиме мешалки или образватели потока работают определенное время (время денитрификации) в течение суток при отключенной системе аэрации, соответственно, остальную часть дня мешалки и образватели потока не работают, а вместо них включается аэрационное оборудование (время аэрации).

Существуют основные рекомендации по расположению мешалок и образвателей потока относительно аэрационного оборудования, имеется в виду донная система аэрации. Данные рекомендации были разработаны с целью исключения каких-либо повреждений компонентов системы аэрации в результате осевого усилия, создаваемого перемешивающим оборудованием. Согласно данным рекомендациям, необходимо выдерживать минимальное расстояние между краем лопасти пропеллера и дисковыми диффузорами. Кроме того, рекомендуется соблюдать небольшой угол наклона в сторону поверхности сточных вод. См. Рис. 23.

Параллельный режим предполагает применение образвателей потока в резервуарах с замкнутым контуром. В этом случае в одном и том же резервуаре (например, аэрационный канал), можно изменять объемы потоков денитрификации и нитрификации путем частичного отключения системы аэрации. При этом образватели потока работают в непрерывном режиме, создавая горизонтальный поток и суспендирование биомассы.

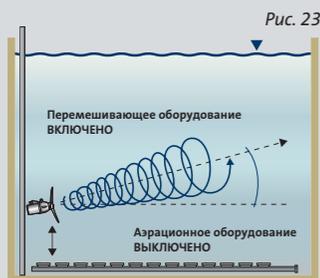


Рис. 23

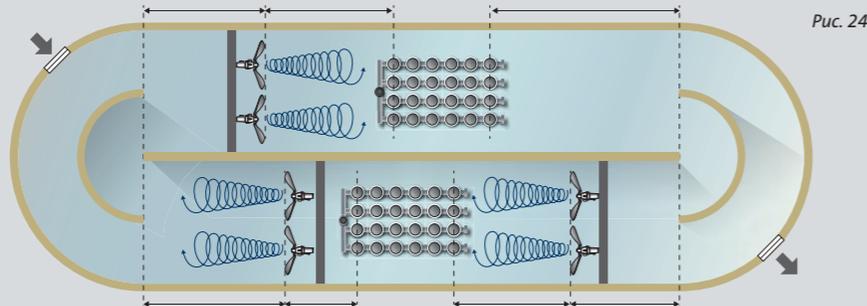


Рис. 24

Правильное размещение образвателей потока относительно коридоров и донной системы аэрации имеет большое значение, поскольку позволяет избежать повреждений как образвателей потока и соответствующего установочного оборудования, так и компонентов системы аэрации. Необходимо выдерживать расстояния, указанные на Рис. 24.

Численные значения этих расстояний приведены далее.

Очистка резервуаров ливневых вод

Резервуары ливневых вод должны тщательно очищаться, поскольку они подвергаются действию песка и прочих неорганических и органических твердых примесей, содержащихся в собранной дождевой воде. Компания Grundfos выпустила руководство «Проектирование резервуаров ливневых вод – Рекомендации и Планировка», содержащее информацию, полезную для инженеров определенных направлений, проектировщиков, планировщиков и организаций, эксплуатирующих системы сточных вод. В этом руководстве рассматриваются все вопросы относительно проектирования резервуаров ливневой воды – от типоразмеров до указаний по установке. Руководство можно скачать с сайта компании или заказать.

Очищать следует не только дно резервуара, но и внутренние поверхности стенок. Необходимость очистки поверхностей вызвана чередованием циклов наполнения и опорожнения, а также изменением уровня воды в резервуаре. Кроме того, ливневая вода, находящаяся в резервуаре определенное время, может стать причиной неприятных запахов, от которых необходимо избавляться.

Используя гидроэжекторы (типа «вода-вода» или «воздух-вода»), например, модели производства Grundfos SFJ FlushJet и SAJ AeroJet, можно одновременно очищать дно и перемешивать весь объем воды (промывочный режим работы), что позволяет откачивать осевшие твердые частицы вместе с ливневой водой.

Естественно, что для выполнения этих задач гидроэжекторы должны создавать достаточное осевое усилие (тягу). Но с учетом больших объемов баков ливневой воды (часто более $\geq 1500 \text{ м}^3$), гидроэжекторы не обеспечивают нужное осевое усилие и длину струи.

Применение одной или нескольких погружных мешалок (как правило, с большой частотой вращения, см. Рис. 25 и 26) позволяет:

- Обеспечить недостающее осевое усилие
- Очищать внутренние поверхности внешних стенок бака

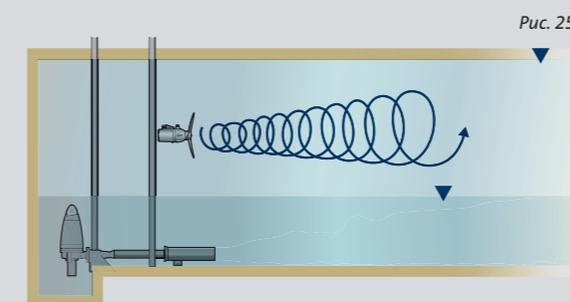


Рис. 25

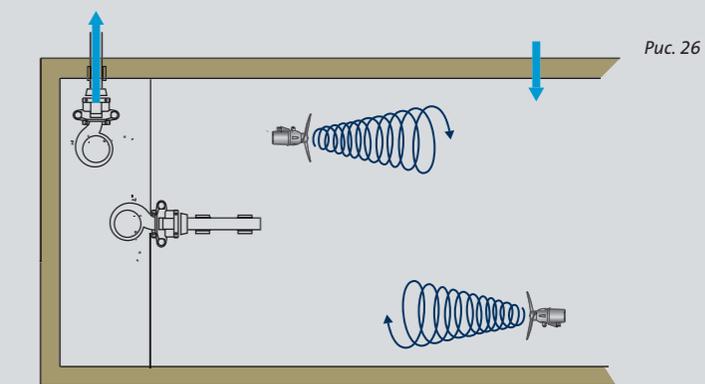


Рис. 26

ПРОЦЕСС ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА КРУПНЫХ И СРЕДНИХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЯХ

В некоторых случаях, до поступления на насосную станцию, сточные воды недостаточно очищаются на стадии механической очистки или вообще не проходят эту ступень. В результате в приемке насоса может накапливаться мелкозернистый и крупнозернистый материал, образующий донное отложение, что существенно осложняет повторное включения насоса.

Чтобы предотвратить формирование подобных отложений крупнозернистого материала, необходимо периодически перемешивать содержимое приемки насоса для его эффективного перекачивания.

Для этого внутри приемки устанавливаются погружные мешалки, которые будут работать в кратковременном режиме. Мешалки можно включить во время заполнения приемки или при достижении минимального уровня в приемке и перед повторным включением насоса. Это обеспечит максимальную гомогенизацию сточной воды, содержащей твердые примеси. Можно устанавливать несколько мешалок, в зависимости от условий заполнения и объема приемки насоса. См. Рис. 27, 28 и 29.

Погружные мешалки должны создавать направленные струи, чтобы исключить повреждение механических компонентов насосов из-за осевого усилия, возникающего при перемешивании.

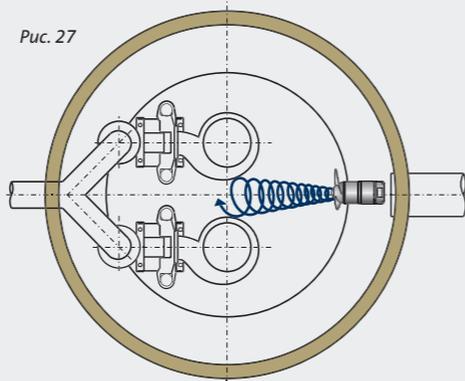


Рис. 27

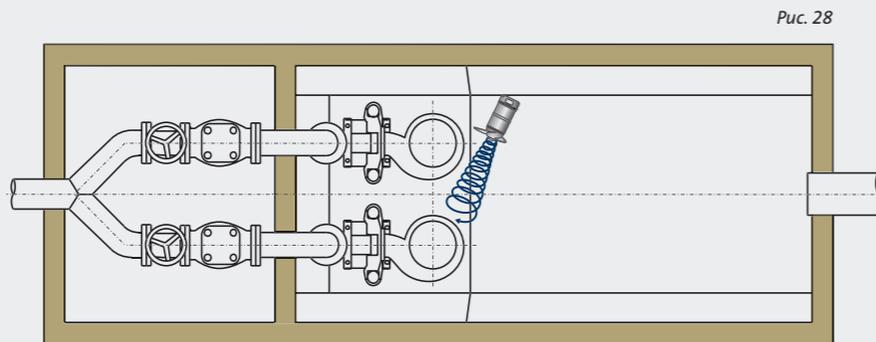


Рис. 28

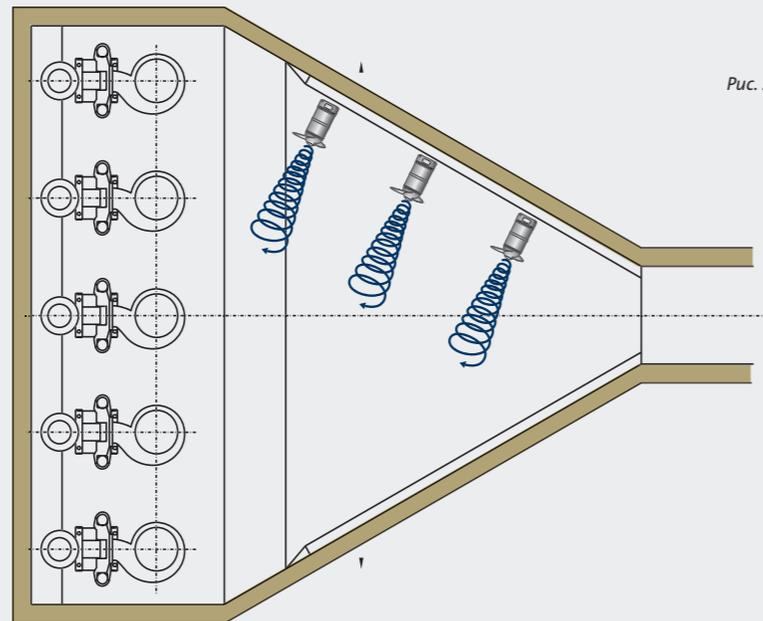


Рис. 29

ГОМОГЕНИЗАЦИЯ НАКОПЛЕННОГО ОСАДКА (СЫРОГО ОСАДКА И ИЗБЫТОЧНОГО АКТИВНОГО ИЛА)

Сырой осадок и избыточный активный ил с этапов механической и биологической очистки сточных вод обычно хранятся в резервуаре, откуда они перекачиваются на дальнейшую обработку. Накопленный осадок требуется надлежащим образом перемешать по следующим причинам:

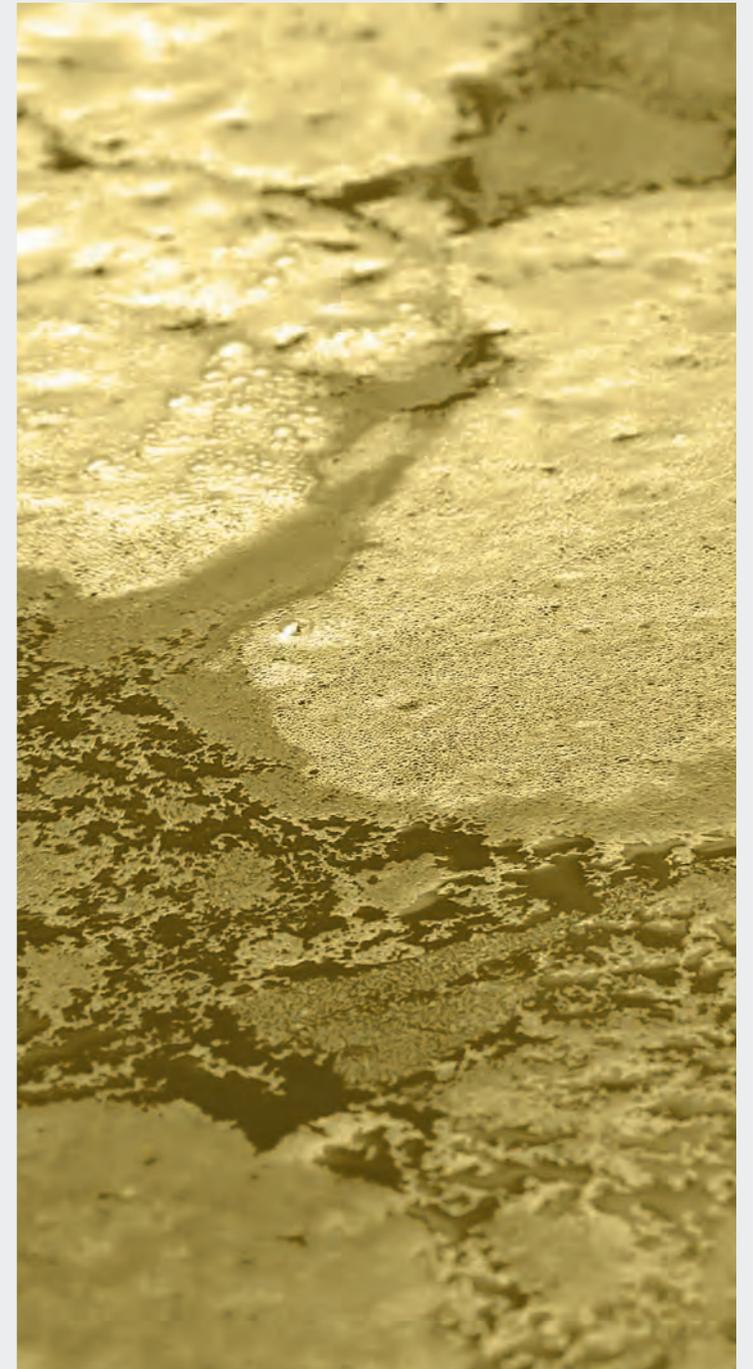
- чтобы не допустить расслоения и возможного образования «корки» на поверхности резервуара;
- чтобы не допустить осаждения твердых частиц;
- чтобы облегчить перекачивание и, соответственно, сократить расход электроэнергии, потребляемой насосами;
- чтобы получить однородную смесь, которую проще перекачать на этап переработки осадка аэробными и анаэробными методами

Для перемешивания осадка идеально подходят погружные мешалки. Для выбора подходящего типа мешалок, способных работать в тяжелых условиях, необходимо знать концентрацию осадка. Рекомендуется соблюдать разумный запас мощности, то есть разницу между фактической мощностью $P_{1\text{actual}}$ (мощность, потребляемая в определенной рабочей точке) и номинальной (расчетной) мощностью $P_{1\text{nominal}}$ (максимальная мощность, потребляемая мешалкой выбранного типа).

ДИСПЕРСИЯ ХИМИЧЕСКИХ РЕАГЕНТОВ В СТОЧНЫХ ВОДАХ/АКТИВНОМ ИЛЕ

При помощи погружных мешалок можно диспергировать химические реагенты, если это необходимо для конкретного процесса очистки стоков. Данная операция выполняется в следующих случаях:

- Диспергирование реагентов в процессе нейтрализации
- Интенсивное перемешивание дозированного количества коагулянтов перед необходимой флокуляцией в процессе обработки осадка
- Диспергирование дозированного количества реагентов в аэротенк для удаления фосфора
- Интенсивное перемешивание коагулянтов в резервуаре вторичного осаждения (седиментации) для повышения осаждающей способности хлопьев ила, т. е. их утяжеление.



ПРАВИЛА

Правильное расположение погружных мешалок и образвателей потока внутри резервуаров очистных сооружений имеет большое влияние на эффективность процесса перемешивания. Высокое качество механических, электрических и гидравлических компонентов, а также рабочие характеристики оборудования (минимальное энергопотребление, равномерное распределение усилий сдвига и скоростей в резервуарах установленного перемешивающего оборудования) – все это может быть сведено на нет из-за неправильного расположения погружных мешалок и образвателей потока. Кроме того, неправильное расположение может иметь негативные последствия на достижение результатов очистки стоков и может привести к сокращению срока службы установленного оборудования.

Общие рекомендации по выбору места установки

В целом, при определении местоположения мешалок и образвателей потока необходимо решить следующие основные задачи:

- Обеспечить максимальный массовый расход в резервуаре
- Установить оборудование таким образом, чтобы создать замкнутый контур
- Обеспечить максимально длинную траекторию струи и, соответственно, максимальный захват жидкости и максимальный массовый расход
- Обеспечить направленность струи с правильным отклонением, чтобы сократить до минимума гидравлические потери
- Установить оборудование на достаточном расстоянии от препятствий (колонн, труб, отводов, систем аэрации и т. д.)

Причинами наблюдающихся несбалансированных нагрузок на работающий пропеллер могут быть:

- Неправильная ориентация мешалки или образвателя потока
- Недостаточное расстояние между пропеллером и боковой или задней стенками резервуара
- Слишком малое расстояние от края лопастей пропеллера до дна резервуара
- Недостаточное расстояние между отдельными мешалками или образвателями потока

Цель приведенных далее правил и рекомендаций – оптимизировать применение мешалок и образвателей потока. Несмотря на это, при принятии окончательного решения необходимо учитывать выбор перемешивающего оборудования, геометрические характеристики резервуара, характеристики сточных вод и специфические технологические процессы. Тем не менее, несоблюдение правил может стать причиной серьезных повреждений мешалок и образвателей потока.

Правила и рекомендации разработаны исходя из технических возможностей оборудования и практического опыта применения погружных перемешивающих установок, оснащенных пропеллерами.

- Недостаточное расстояние до изгибов окислительных каналов
- Препятствия перед пропеллером и результирующая встречная волна, бьющая в пропеллер
- Размещение оборудования непосредственно перед впускным отверстием резервуара и в непосредственной близости от него: поступающая жидкость может вызвать вибрации на опоре установки и, соответственно, на мешалке/образвателе потока
- Недостаточное расстояние по вертикали между пропеллером и системой придонных дисковых диффузоров с полным покрытием поверхности (например, резервуары с чередованием циклов денитрификации и нитрификации)
- Недостаточное расстояние по горизонтали между пропеллером и системой придонных дисковых диффузоров с частичным покрытием поверхности (например, резервуары замкнутого цикла, такие как окислительные каналы карусельного и кольцевого типа, а также любые резервуары с дисковыми диффузорами с частичным покрытием поверхности)
- Неправильная ориентация и недостаточное расстояние между пропеллером и уже имеющимся аэрационным оборудованием (например, поверхностные турбины, погружной аэратор с самовсасыванием или принудительной подачей воздуха).

На последующих страницах приводятся указания по минимизации описанных выше недостатков.

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОЯВЛЕНИЯ КОРОТКО ЗАМКНУТЫХ ПОТОКОВ

Мешалки и образватели потока должны быть расположены таким образом, чтобы исключить образования коротко замкнутых потоков в резервуаре. Это означает, что направление струйного потока не должно совпадать с линией от входного до выходного отверстия резервуара. См. Рис. 30.

В противном случае возможны следующие негативные последствия:

- Сокращение времени пребывания сточных вод в резервуаре, что может иметь негативные последствия для протекания биохимических процессов.
- Образование так называемых «застойных зон», в которых из-за уменьшения придонной скорости происходит осаждение твердых частиц.

ИНТЕНСИВНОЕ И НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОСТУПАЮЩИХ ПОТОКОВ В РЕЗЕРВУАР

Как отмечалось выше, на очистных сооружениях сточных вод в резервуар могут поступать различные потоки. Рекомендуется установить и направить одну из выбранных мешалок или образвателей потока таким образом, чтобы образующийся струйный поток захватывал все поступающие стоки, обеспечивая их интенсивное и непосредственное перемешивание. На Рис. 31 показаны три разных входящих в резервуар потока, отмеченные как 1, 2 и 3.

ИСКЛЮЧЕНИЕ ЗАВИХРЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ: ЛЕГКОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ

Неправильное расположение мешалок и образвателей потока (например, такое размещение, при котором струйный поток направлен в сторону поверхности (см. Рис. 32)) приводит к завихрениям на поверхности воды и последующему захвату воздуха. В результате в сточные воды поступает дополнительный кислород. Это является нежелательным фактором, способным негативно отразиться на некоторых процессах.

Типичными примерами являются аноксидные процессы, такие как денитрификация (в этом случае концентрация растворенного кислорода должна поддерживаться на уровне $\leq 0,1-0,3$ мг/л), и анаэробные процессы, такие как дефосфатация (в этом случае присутствие растворенного кислорода должно быть исключено).



Рис. 30

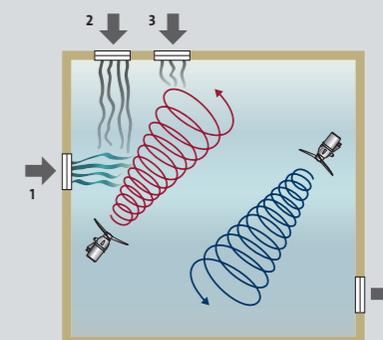


Рис. 31

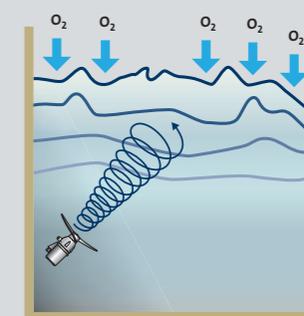


Рис. 32

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОЯВЛЕНИЯ ЗАСТОЙНЫХ ЗОН

Необходимо исключить появление «застойных» зон в резервуаре, где средняя скорость воды в придонной области резервуара недостаточная для удержания твердых частиц во взвешенном состоянии. Для этого необходимо правильно подобрать и расположить перемешивающее оборудование.

Типичным примером является окислительный канал. В этом случае при подборе образвателей потока необходимо учитывать количество устройств и суммарное осевое усилие, необходимое для создания горизонтального потока и удержания биомассы во взвешенном состоянии. На Рис. 33 и 34 показаны, соответственно, осевшие твердые частицы и частицы, удерживаемые во взвешенном состоянии.

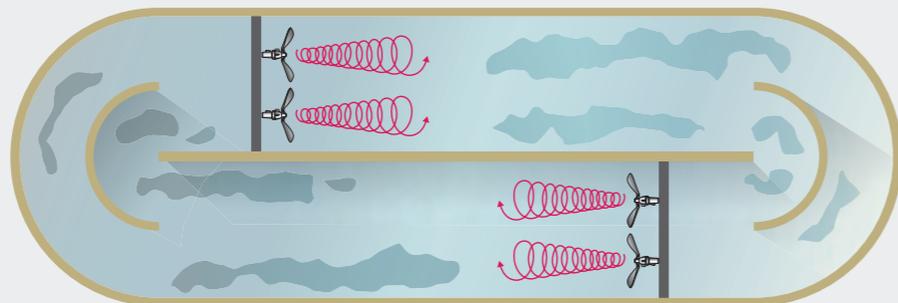


Рис. 33

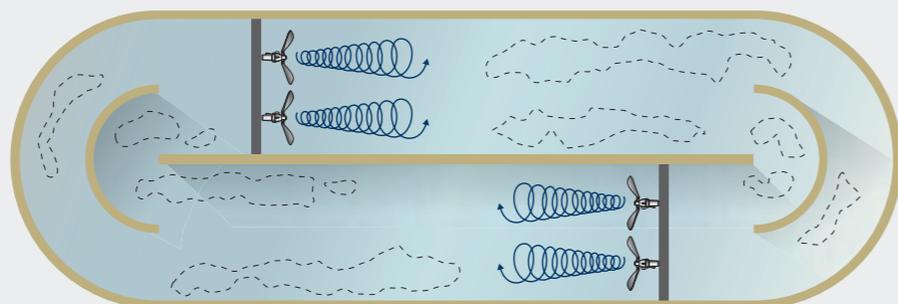


Рис. 34

Общие правила выбора места установки

МИНИМАЛЬНАЯ ГЛУБИНА ПОГРУЖЕНИЯ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЗАВИХРЕНИЙ

Завихрения (см. Рис. 35 и 36) являются причиной неравномерных нагрузок на пропеллер и ударных нагрузок на механические компоненты погружного перемешивающего оборудования, такие как подшипники, уплотнения и т. д. Если край лопасти пропеллера находится слишком близко к поверхности воды, то с задней стороны пропеллера образуется завихрение, и поток воздуха может создать ударную нагрузку на лопасти пропеллера.

Рекомендуемая **минимальная глубина погружения** h_s погружных мешалок и образвателей потока, необходимая для предотвращения образования завихрений, определяется как минимальное расстояние между краями лопастей пропеллера и поверхностью воды (см. Рис. 37 и 38).

Это значение, выведенное эмпирическим путем, представляет собой оптимальный режим потока для правильной установки мешалок и образвателей потока

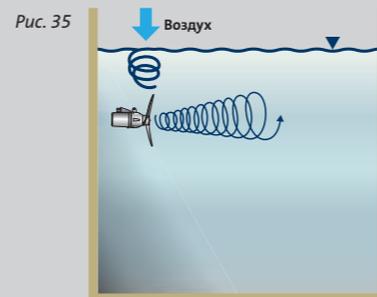


Рис. 35



Рис. 36

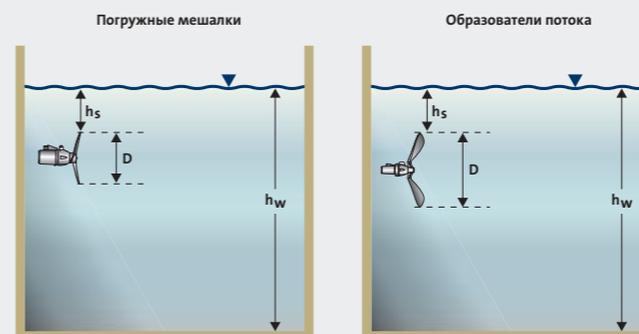


Рис. 37: Глубина погружения мешалки

Рис. 38: Глубина погружения образвателя потока

На практике минимальная глубина погружения h_s для погружных мешалок и образвателей потока Grundfos определяется по следующим формулам, где D – диаметр пропеллера:

$$h_s = D \text{ — для мешалок Grundfos серий AMD и AMG}$$

$$h_s = 0,75 \times D \text{ — для образвателей потока Grundfos серии AFG}$$

Чем выше вязкость жидкости, тем меньше риск образования завихрений как, например, в случае тяжелых осадков или шлама или в ситуациях с турбулентной поверхностью воды. В этих случаях можно использовать меньшие значения глубины погружения.

Тем не менее, полное отсутствие завихрений при работе оборудования гарантировать невозможно.

МИНИМАЛЬНОЕ РАССТОЯНИЕ ДО ДНА И БОКОВЫХ СТЕНОК РЕЗЕРВУАРА

В большинстве случаев на очистных сооружениях мешалки и образватели потока необходимо устанавливать максимально близко ко дну резервуара. Это необходимо для того, чтобы твердые частицы удерживались во взвешенном состоянии и не осаждались на дно. В то же время это сохраняет объемный поток, необходимый для достижения максимально возможной степени гомогенизации.

Если перемешивающее оборудование установлено слишком близко ко дну резервуара, то в любой момент это может привести к ухудшению эксплуатационных показателей и снижению эффективности, а также высокой концентрации напряжений между краем пропеллера и дном резервуара. См. Рис. 39.

Для обеспечения максимального потока перемешивания и минимальных местных потерь напора минимальное расстояние h_{min} между краем лопасти пропеллера и дном резервуара необходимо выдерживать расстояние, указанное на Рис. 40 и 41. Это значение получено эмпирическим путем в результате испытаний.

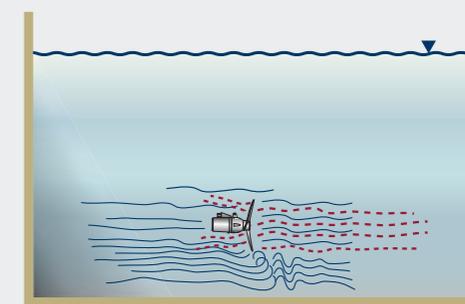


Рис. 39

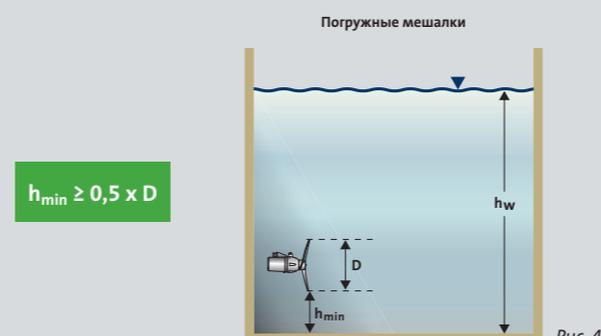


Рис. 40

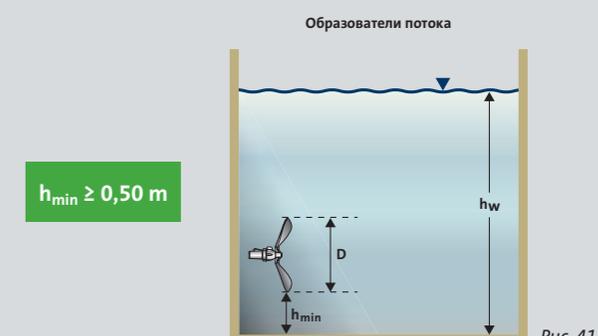


Рис. 41

Неверное расстояние между краем лопасти пропеллера и боковыми стенками резервуара может уменьшить эффективность перемешивания, а также негативно отразиться на образовании потока. Кроме того, это может привести к образованию вибраций в погружном оборудовании из-за высокой концентрации напряжений между кромкой лопасти пропеллера и боковыми стенками резервуара. См. Рис. 42.

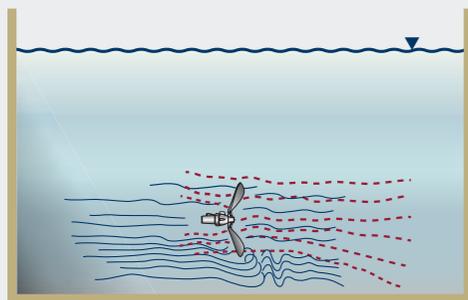


Рис. 42

Минимальные расстояния s_w были получены эмпирическим путем в результате испытаний. См. на Рис. 43 и 44.

При определении значения s_w необходимо учитывать частоту вращения пропеллера.

В случае устройств с высокой частотой вращения результаты испытаний погружных мешалок показывают, что значение s_w зависит от значения диаметра D .

В случае устройств с низкой частотой вращения результаты испытаний образователей потока показывают, что значение s_w не зависит от значения диаметра D пропеллера.

Погружные мешалки

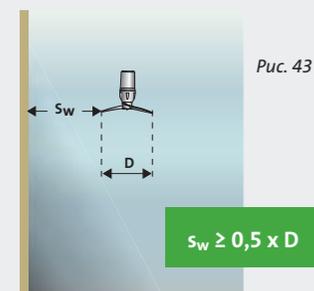


Рис. 43

Образователи потока

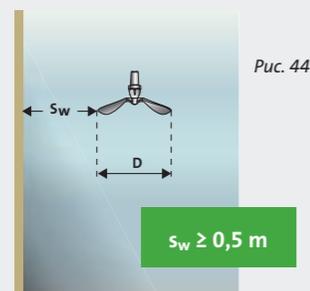


Рис. 44

Приведенные далее результаты CFD моделирования подтверждают обоснованность правила, согласно которому минимальное расстояние s_w между краем пропеллера образвателя потока и боковой стенкой резервуара должно быть больше 0,50 м.

Данные по CFD моделированию относятся к окислительному каналу со следующими характеристиками:

Длина канала L_c	68	м
Ширина канала W	7,5	м
Уровень воды в резервуаре h_w	5,85	м
Высота стенки	6,35	м
Приток сточных вод	500	м ³ /ч
Требуемая скорость потока	0,3	м/с
Общее процентное содержание твердых частиц	0,5	%
Система аэрации не установлена		
Требуемое осевое усилие (включая запас надежности 5%):	4537	Н
Расчетное кол-во и модели образвателей потока	3 шт. x AFG.22.230.25	
Суммарное осевое усилие	4695	Н

Рассмотрены два режима эксплуатации – правильный и неправильный (см. Рис. 45 ниже):

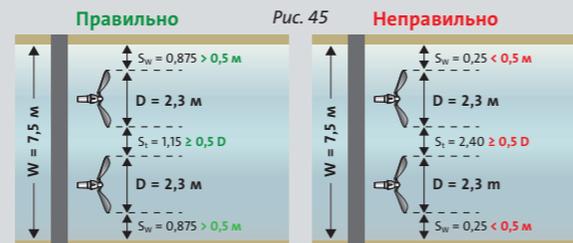
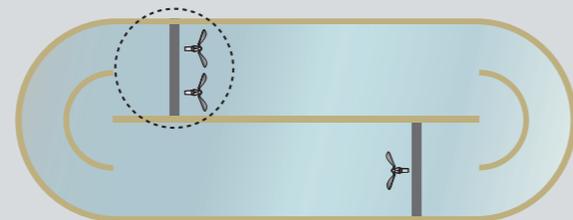
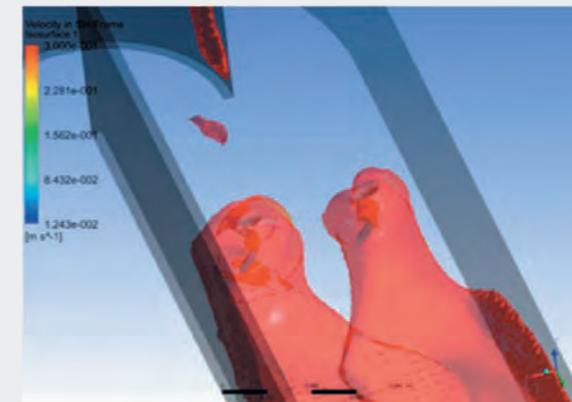


Рис. 45

Результаты CFD моделирования были следующими: **МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА**

Профиль скорости потока по ISO

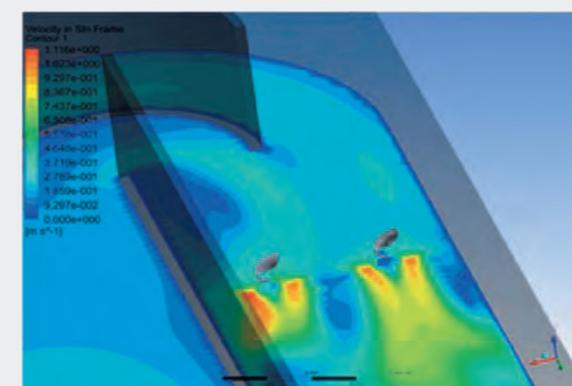


правильное расположение ($s_w=0,875$ м)

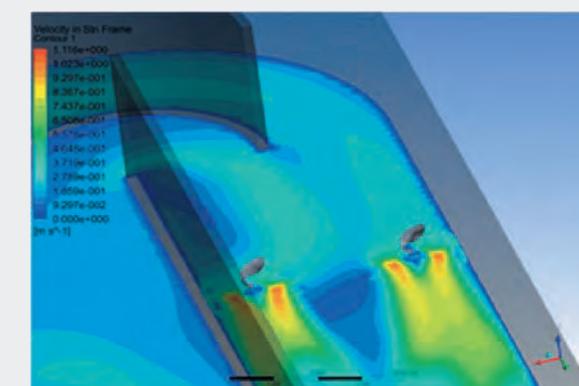


неправильное расположение ($s_w=0,25$ м)

Профиль скорости потока в проекции

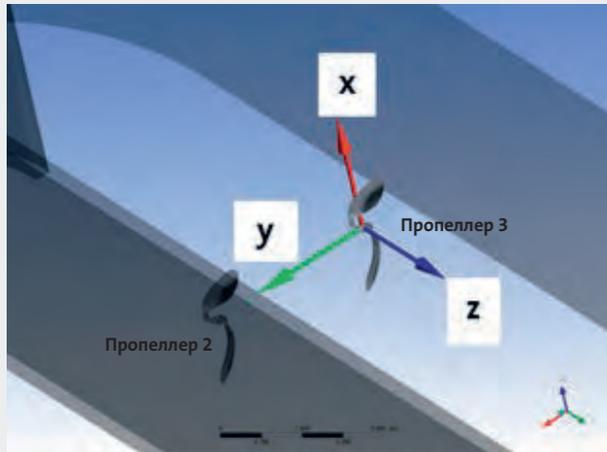


правильное расположение ($s_w=0,875$ м)



неправильное расположение ($s_w=0,25$ м)

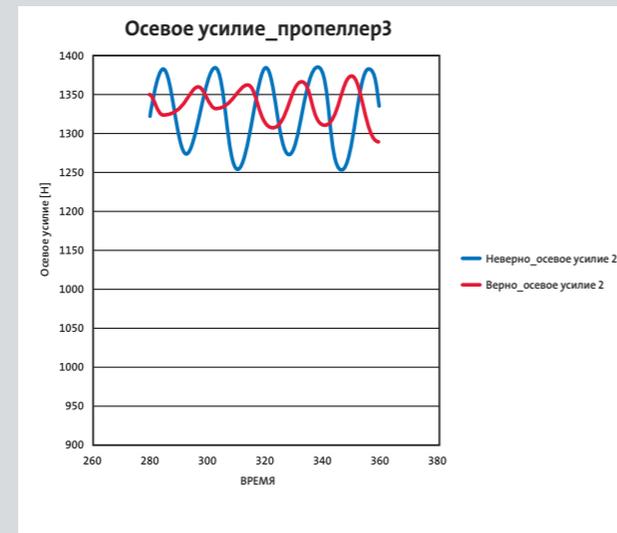
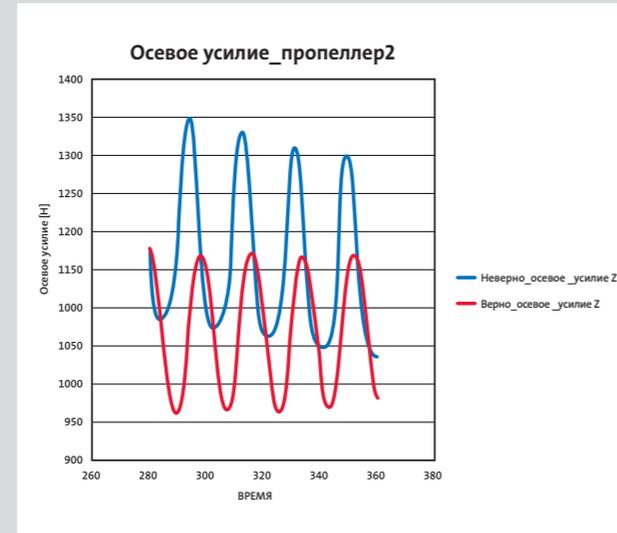
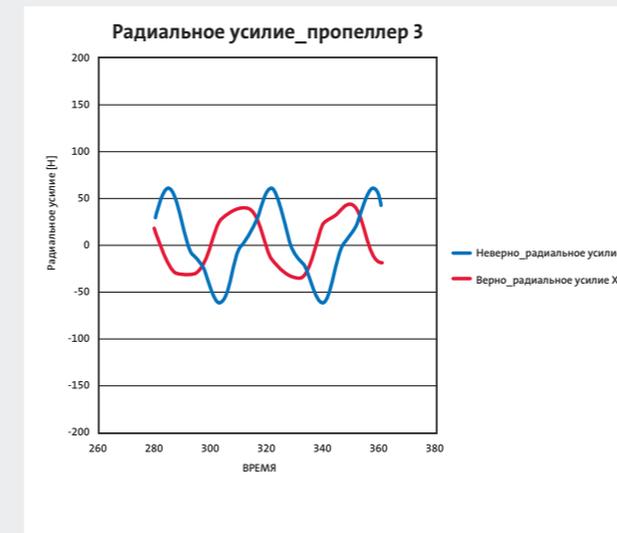
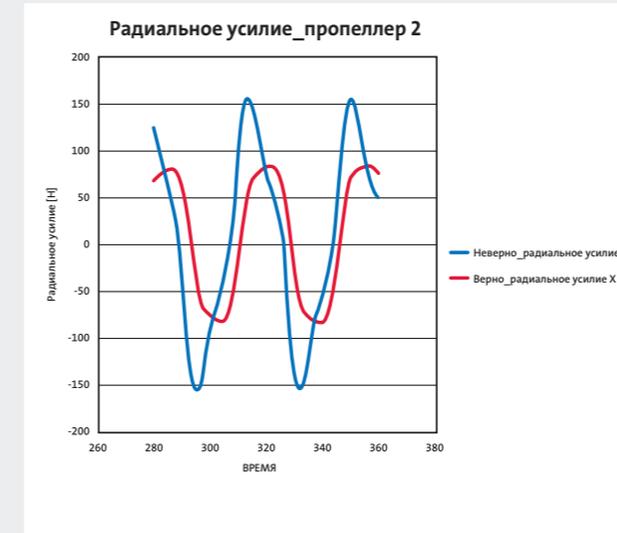
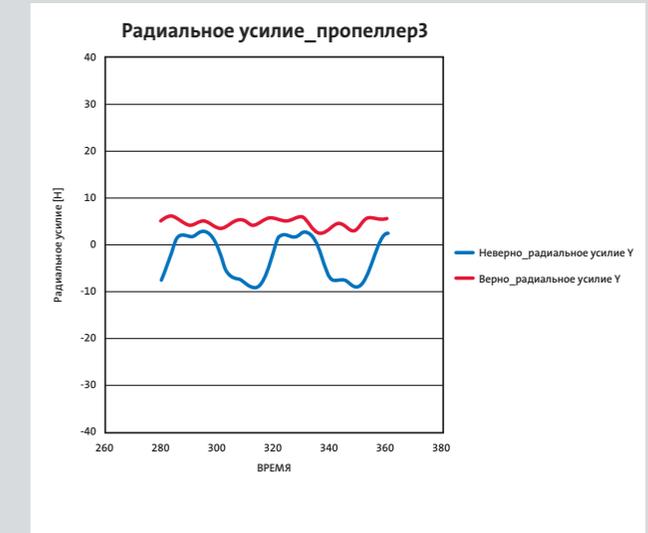
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА



Неправильное расположение приводит к большому колебанию усилий пропеллера в осевом и радиальном направлениях, а также к большой нагрузке на образователь потока из-за более несбалансированного потока перед образователем потока; это может привести к периодическому вибрированию пропеллера и, как результат, к ухудшению эксплуатационных показателей.

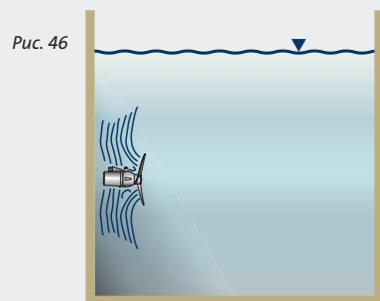
На схемах далее показаны колебания значений осевого усилия в осевом (ось Z) и радиальном направлениях (оси X, Y) для каждого из пропеллеров (правильной и неправильной установки). На каждой схеме видно, что неправильное расположение является причиной чрезмерно высоких колебаний (синие линии), что может не только ухудшить эксплуатационные показатели, но и привести к серьезным механическим повреждениям компонентов образователя потока и монтажных принадлежностей.

Более того, неправильное расположение образователя потока является причиной перерасхода энергии потока, созданного образователем потока, и существенных потерь на трение вдоль стенок резервуара.

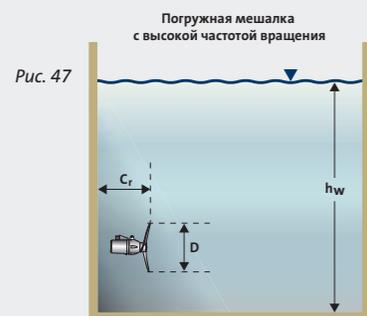
Сила, действующая в осевом направлении
(в направлении Z)Сила, действующая в радиальном направлении
(в направлении X)Сила, действующая в радиальном направлении
(в направлении Y)

МИНИМАЛЬНОЕ РАССТОЯНИЕ ДО ЗАДНЕЙ СТЕНКИ

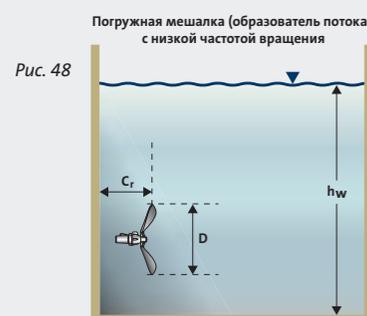
Недостаточное расстояние между краем пропеллера и задней стенкой резервуара может стать причиной возмущений потока, действующих на пропеллер, и привести к несбалансированным нагрузкам, которые могут повредить перемешивающее оборудование. См. Рис. 46.



Минимальные расстояния до задней стенки резервуара C_r , полученные эмпирическим путем в результате испытаний, показаны на Рис. 47 и 48.



$$C_r \geq 1,5 \times D$$



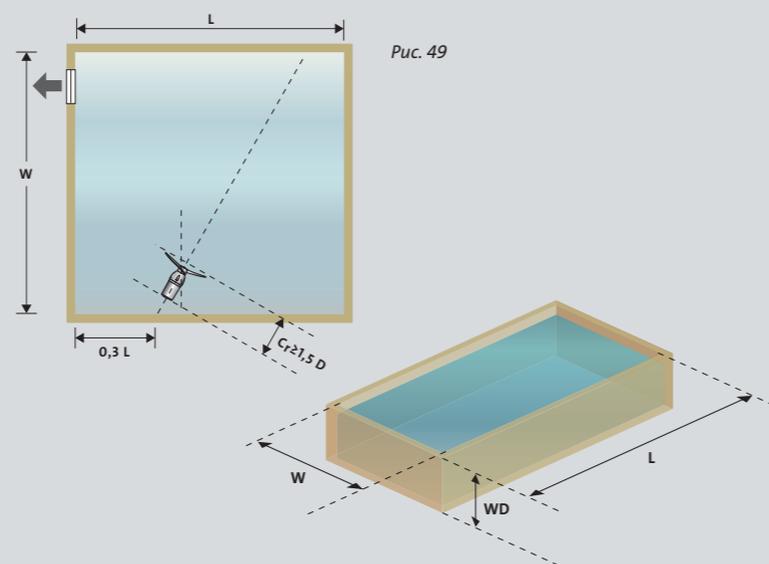
$$C_r \geq 2 \times D$$

Приведенные далее результаты CFD моделирования подтверждают обоснованность правила, согласно которому минимальное расстояние $C_r \geq 1,5 D$ См. Рис. 49.

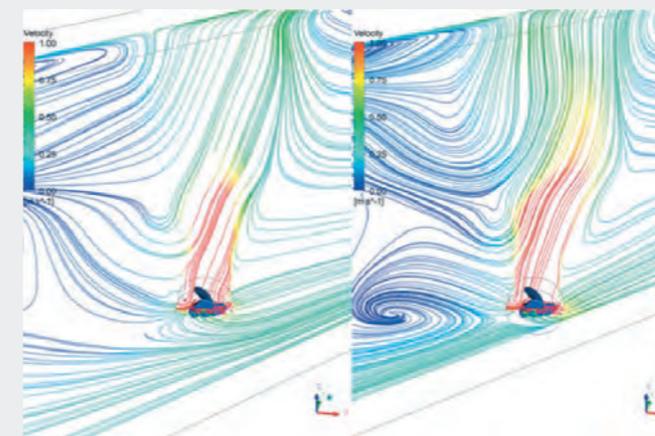
Данные по CFD моделированию относятся к прямоугольному резервуару со следующими характеристиками:

Длина резервуара L	15 м
Ширина резервуара W	8 м
Уровень воды в резервуаре h_w	4 м
Высота стенки	4,5 м
Приток сточных вод	96 м ³ /ч
Общее процентное содержание твердых частиц	0,5 %
Площадь поверхности	120 м ²
Объем воды	480 м ³
Система аэрации не установлена	
Требуемое осевое усилие (включая запас надежности 5%)	883 Н
Расчетное кол-во и модели мешалок	1 x AMG.45.5B.675.5.1A
Диаметр пропеллера D	450 мм
Суммарное осевое усилие	965 Н

Тип применения: Перемешивание и гомогенизация.



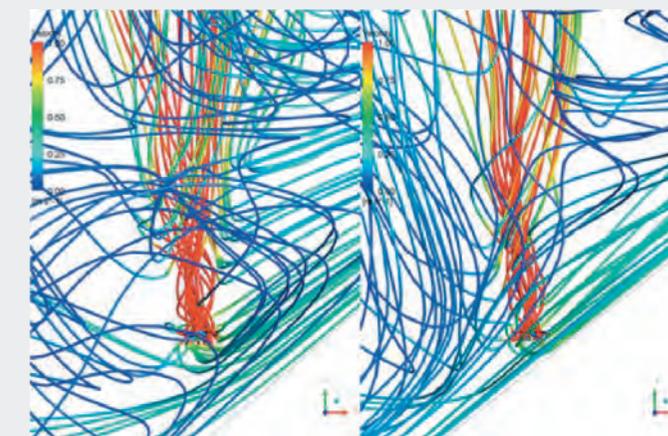
Результаты CFD моделирования показывают сравнительные схемы потоков в зависимости от расположения мешалки:



правильное расположение
($C_r \geq 1,5 D$)



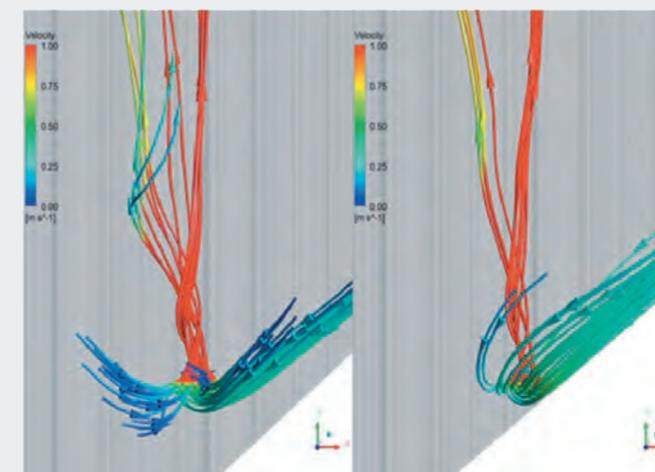
неправильное расположение
($C_r \leq 1,5 D$)



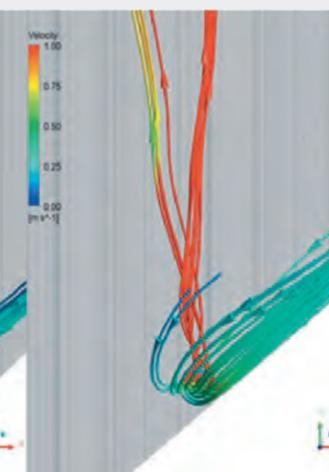
правильное расположение
($C_r \geq 1,5 D$)



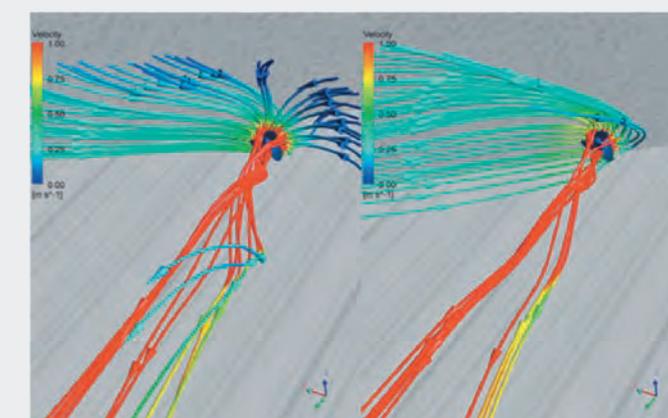
неправильное расположение
($C_r \leq 1,5 D$)



правильное расположение
($C_r \geq 1,5 D$)



неправильное расположение
($C_r \leq 1,5 D$)

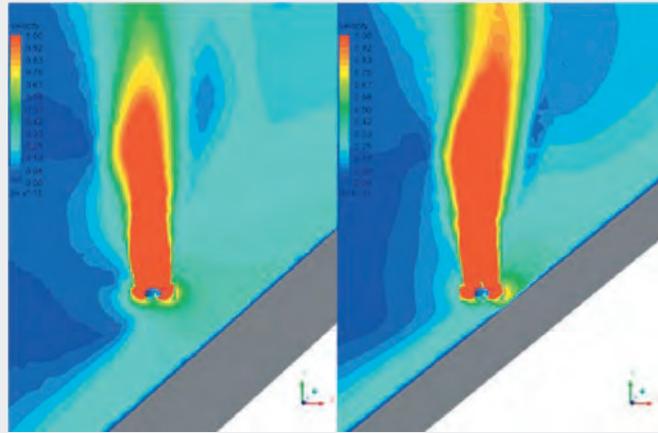


правильное расположение
($C_r \geq 1,5 D$)



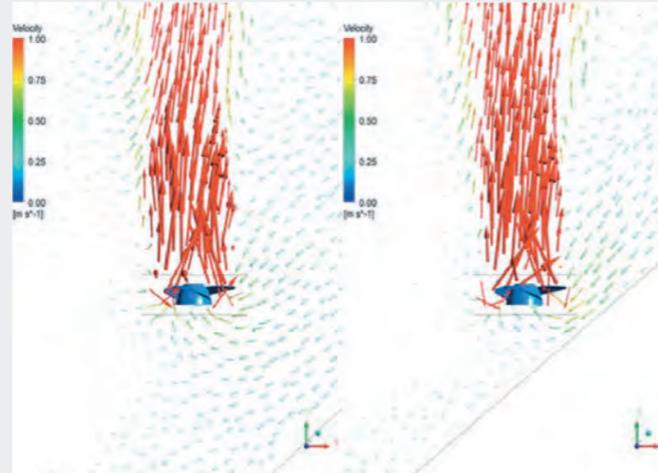
неправильное расположение
($C_r \leq 1,5 D$)

СРАВНЕНИЕ РЕЖИМОВ ПОТОКА



правильное расположение
($C_r \geq 1,5 D$)

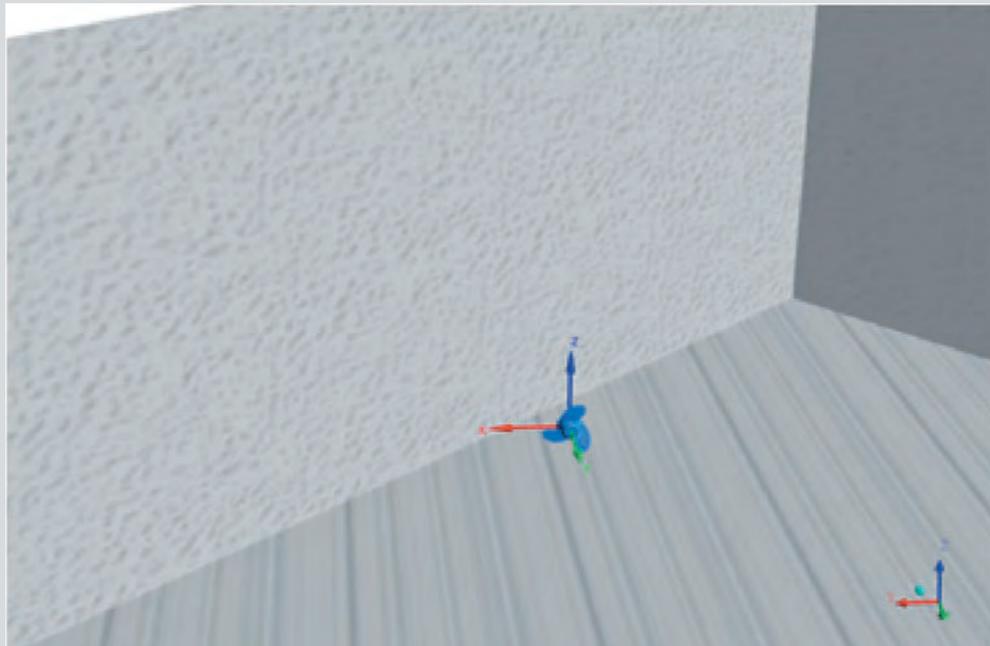
неправильное расположение
($C_r \leq 1,5 D$)



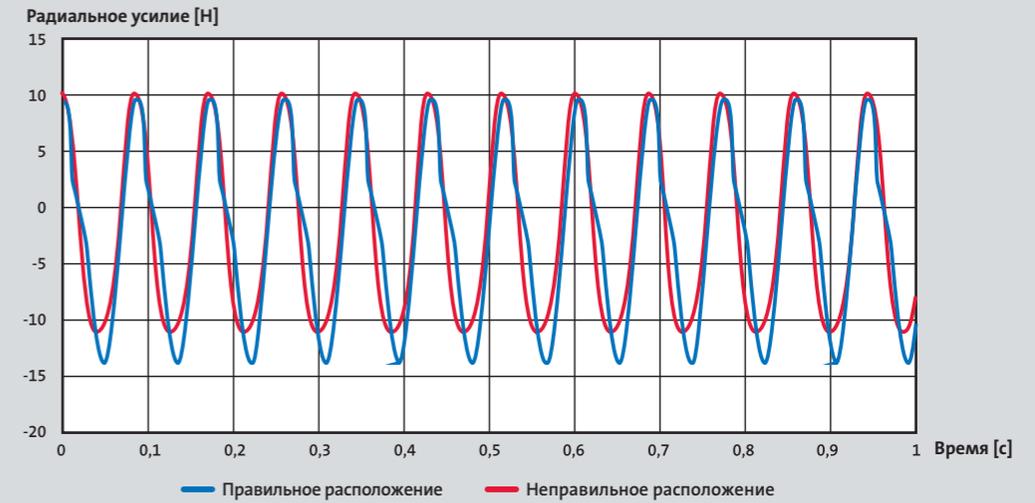
правильное расположение
($C_r \geq 1,5 D$)

неправильное расположение
($C_r \leq 1,5 D$)

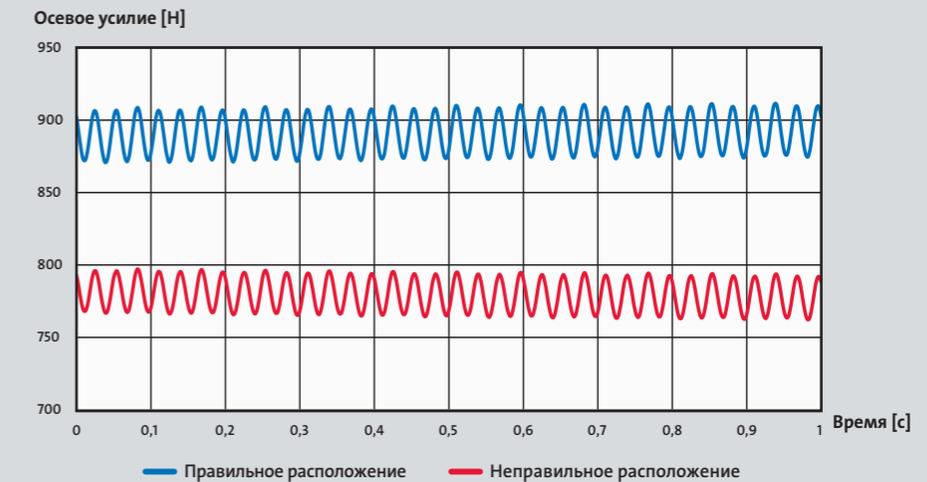
ИЗМЕНЕНИЯ УСИЛИЙ



Сила, действующая в радиальном направлении (в направлении X и Z)



Сила, действующая в осевом направлении (в направлении Y)



Сравнение результатов CFD моделирования показывает, что если расстояние от мешалки до задней стенки резервуара $\leq 1,5 D$, то влияние радиального усилия незначительно, в то время как влияние осевого усилия существенно из-за взаимодействия объемного потока и задней стенки резервуара. Это негативно сказывается на эксплуатационных показателях мешалки и является причиной опасных вибраций, воздействующих на мешалку, а также на монтажные принадлежности

МИНИМАЛЬНОЕ РАССТОЯНИЕ ДО ПРЕПЯТСТВИЙ

В отдельных случаях погружные мешалки и образователи потока не могут полностью сформировать струю из-за препятствий в резервуаре (например, колонны, поддерживающие крышу резервуара, или иные ранее существовавшие бетонные конструкции, такие как высокие фундаменты на дне резервуара и т. д.). Погружное оборудование, размещенное слишком близко к препятствиям, может подвергаться действию противотока. См. Рис. 50 и 51.

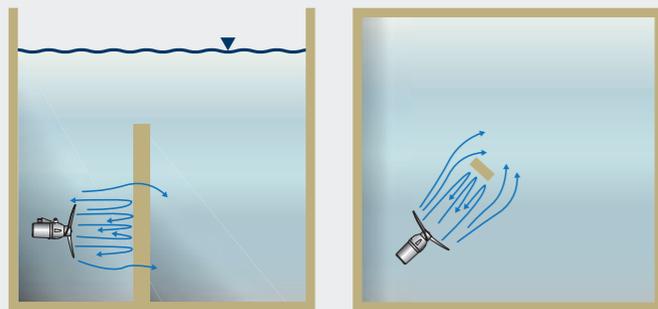


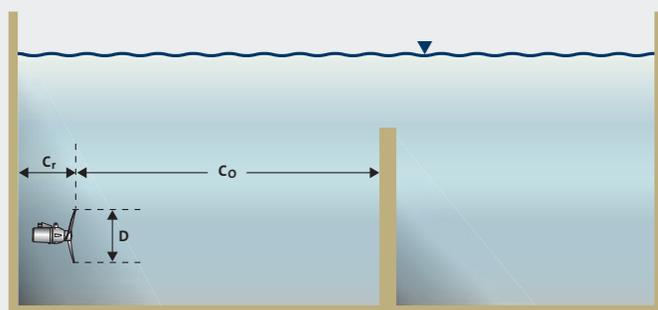
Рис. 50

Рис. 51

Чтобы струя была полностью сформирована, расстояние C_0 от мешалки или образователя потока должно как минимум в десять раз превышать диаметр пропеллера. См. Рис. 52.

$$C_0 \geq 10 D$$

Рис. 52

**МЕШАЛКИ, НАПРАВЛЕННЫЕ ВВЕРХ И ВНИЗ**

В некоторых случаях для достижения особых целей погружные мешалки должны быть направлены вверх или вниз.

Мешалки, направленные вниз

Мешалка, направленная вниз, должна устанавливаться в глубоком резервуаре. Резервуар считается глубоким в следующих случаях:

- Цилиндрический резервуар: уровень воды в резервуаре $h_w \geq$ диаметру резервуара D
- Квадратный резервуар: уровень воды в резервуаре $h_w \geq$ длине боковой стенки резервуара
- Прямоугольный резервуар: уровень воды в резервуаре $h_w \geq$ длине самой длинной боковой стенке резервуара
- Резервуар с замкнутым контуром: уровень воды в резервуаре $h_w \geq$ ширине канала

Пример специфических целей:

- Предотвращение оседания твердых частиц на дно резервуара
- Улавливание плавающих твердых частиц с поверхности воды

Мешалка должна быть направлена вниз по направлению ко дну резервуара, при этом угол α максимального отклонения от горизонтали составляет 30° .

Минимальное расстояние h_{min} от края пропеллера до дна резервуара должно быть равно значению h_w , умноженному на коэффициент от 0,2 до 0,3. См. Рис. 53.

$$0,20 h_w \leq h_{min} \leq 0,30 h_w$$

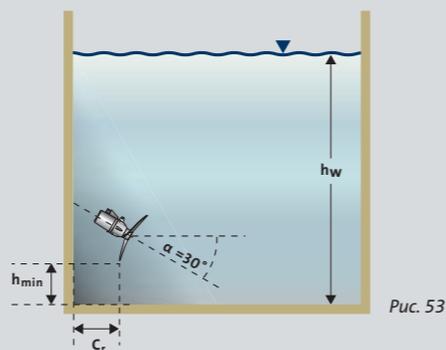


Рис. 53

Мешалки, направленные вверх

Если цель применения мешалки – предотвратить образование корки на поверхности резервуара, то мешалка должна быть направлена вверх под правильным углом.

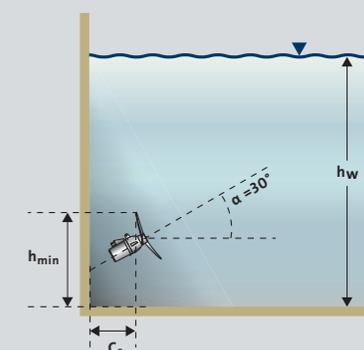
$$\alpha \leq 30^\circ$$

$$0,30 h_w \leq h_{min} \leq 0,50 h_w$$

Мешалка должна быть направлена вверх по направлению к поверхности воды, при этом угол α максимального отклонения от горизонтали составляет 30° .

Минимальное расстояние h_{min} от края пропеллера до дна резервуара должно быть равно значению h_w , умноженному на коэффициент от 0,3 до 0,5. См. Рис. 54.

Рис. 54

**РАСПОЛОЖЕНИЕ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПРОЕКЦИИ**

Приведенные далее правила используются для выбора расположения погружных мешалок и образователей потока и распространяются на не аэрируемые и аэрируемые резервуары.

Квадратные резервуары

Погружные мешалки и образователи потока должны размещаться от угла резервуара на расстоянии, равном длине боковой стенки резервуара S , умноженной на коэффициент 0,3. Осевая линия должна быть направлена так, как показано на Рис. 55, 56, 57 и 58.

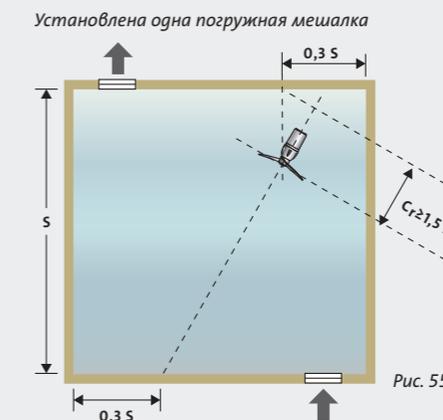


Рис. 55

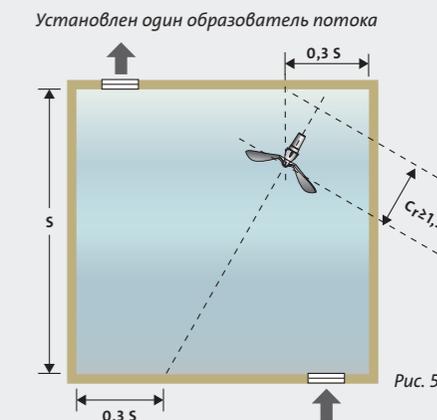


Рис. 56

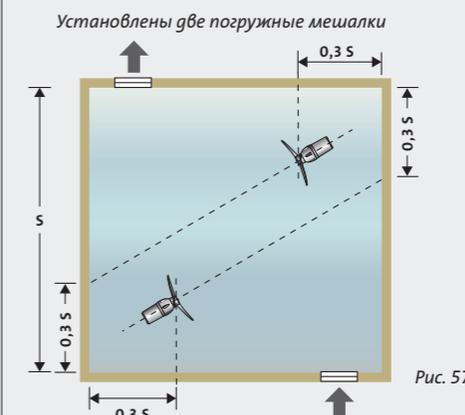


Рис. 57

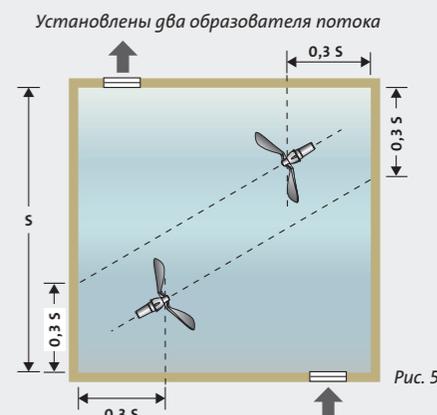


Рис. 58

В тех случаях, когда в одном и том же квадратном резервуаре необходимо установить дополнительные мешалки или образователи потока, необходимо обратиться за консультацией в компанию Grundfos. Специалисты компании помогут выбрать оптимальное местоположение для установки оборудования.

Прямоугольные резервуары

Необходимо учитывать соотношение между длиной **L** и шириной **W** резервуара, а также вариант установки одного или двух перемешивающих устройств.

$1,5 < L/W \leq 2,5$

Установлено одно перемешивающее устройство

Погружная мешалка и образователь потока должны размещаться от угла резервуара на расстоянии, равном ширине **W**, умноженной на коэффициент 0,3. Осевая линия должна быть направлена так, как показано на Рис. 59 и 60.

Установлена одна погружная мешалка

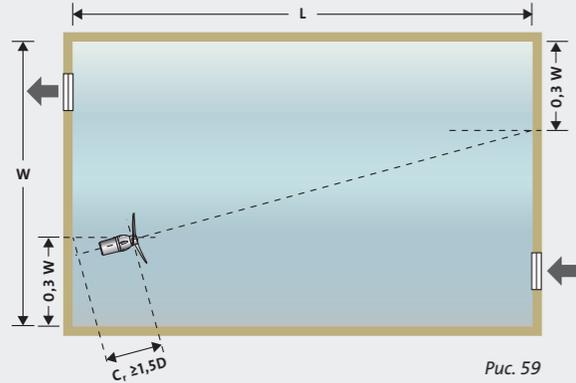


Рис. 59

Установлен один образователь потока

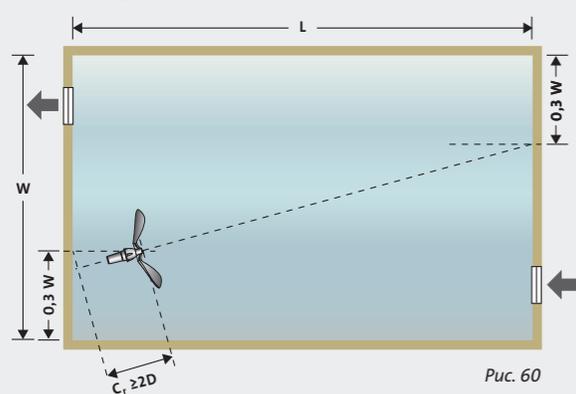


Рис. 60

Установлено два перемешивающих устройства

Погружные мешалки и образователи потока должны размещаться от угла резервуара на расстоянии, равном ширине **W**, умноженной на коэффициент 0,3. Осевая линия должна быть направлена так, как показано на Рис. 61 и 62.

Установлены две погружные мешалки

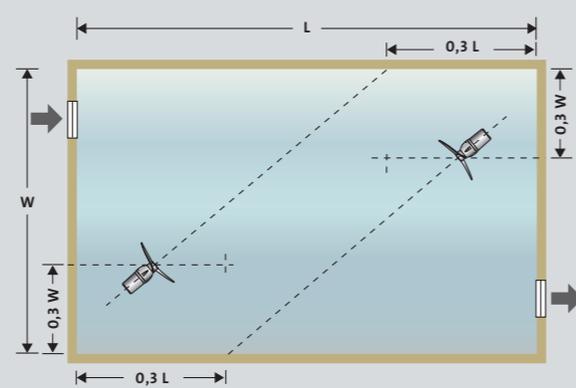


Рис. 61

Установлены два образователя потока

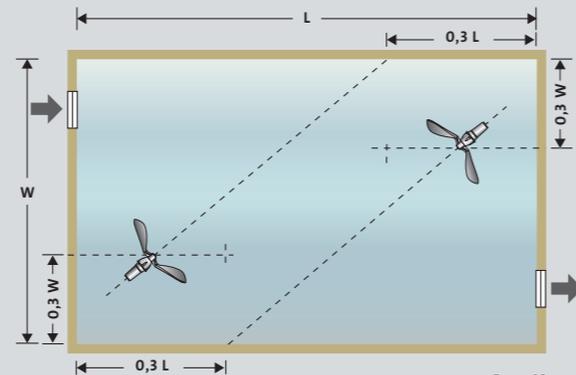


Рис. 62

$1,0 < L/W \leq 2,0$

В случае более компактного резервуара, то есть когда соотношение длины резервуара к его ширине меньше или равно 2, рекомендуется рассмотреть еще один вариант расположения. Погружная мешалка или образователь потока могут располагаться так, как показано на Рис. 63 и 64. Необходимо также учитывать расположение входа и выхода жидкости, как было описано выше.

Эти правила могут также применяться как варианты расположения перемешивающего оборудования в квадратном резервуаре.

В тех случаях, когда в одном и том же квадратном резервуаре необходимо установить дополнительные мешалки или образователи потока, необходимо обратиться за консультацией в компанию Grundfos. Специалисты компании помогут выбрать оптимальное место для установки

Погружная мешалка

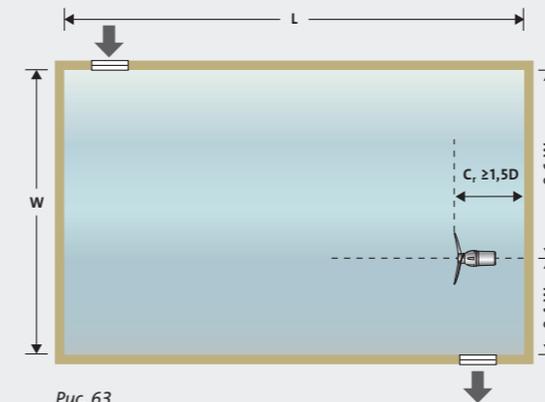


Рис. 63

Образователь потока

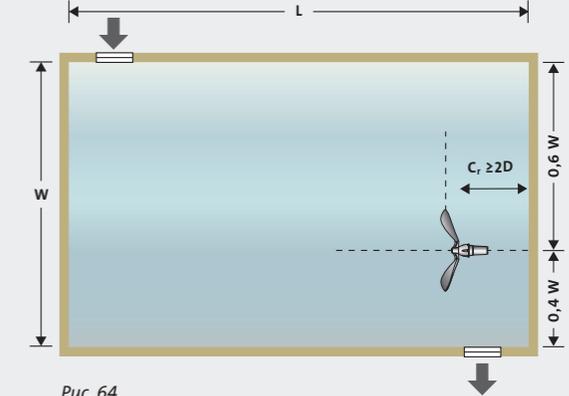


Рис. 64



$$2,5 < L/W \leq 3,0$$

На Рис. 65 и 66 показано рекомендуемое расположение погружных мешалок и образователей потока в случаях, когда соотношение L/W находится в указанном выше диапазоне.

Установлена одна погружная мешалка

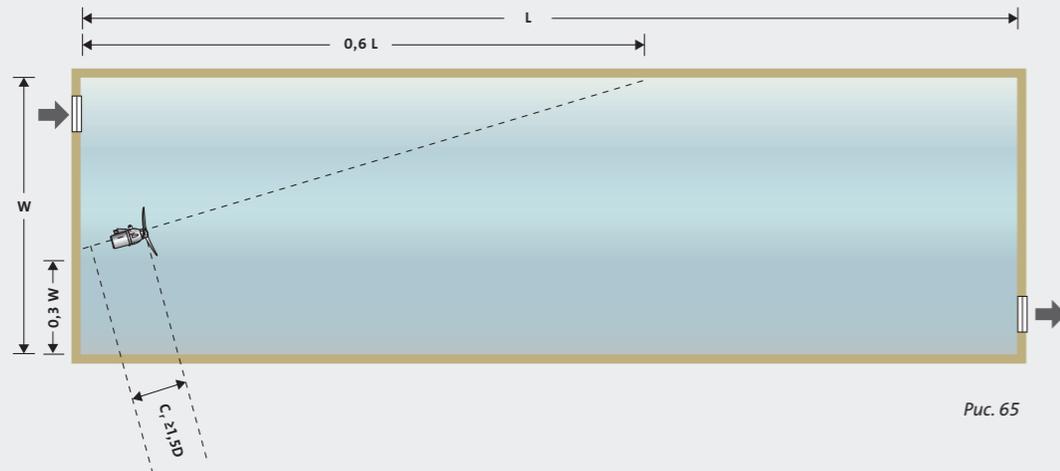


Рис. 65

Установлен один образователь потока

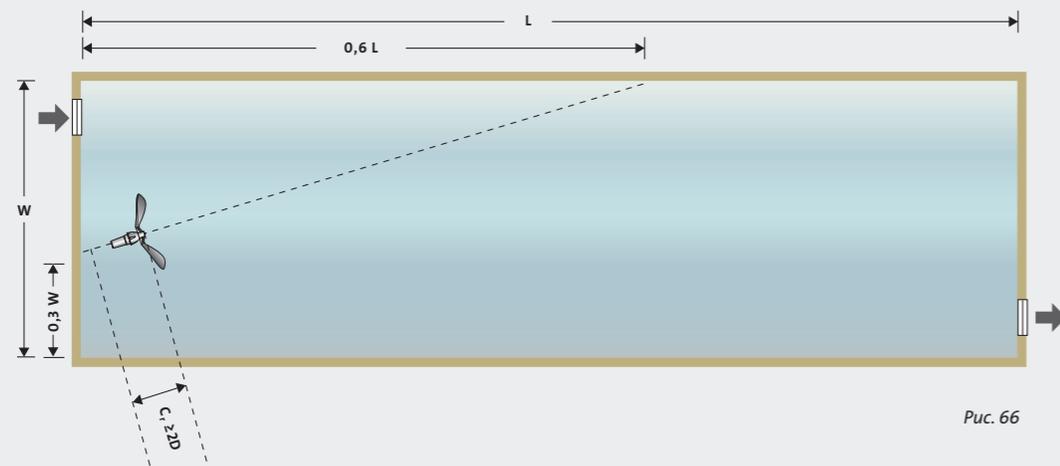


Рис. 66

$$L/W \geq 3,0$$

В тех случаях, когда соотношение $L/W \geq 3,0$, необходимо установить дополнительные мешалки или образователи потока.

Предлагается последовательная установка. Практический опыт и результаты испытаний показали, что расстояние между двумя соседними мешалками должно быть как минимум равно ширине резервуара, умноженной на коэффициент 2,5.

Погружные мешалки

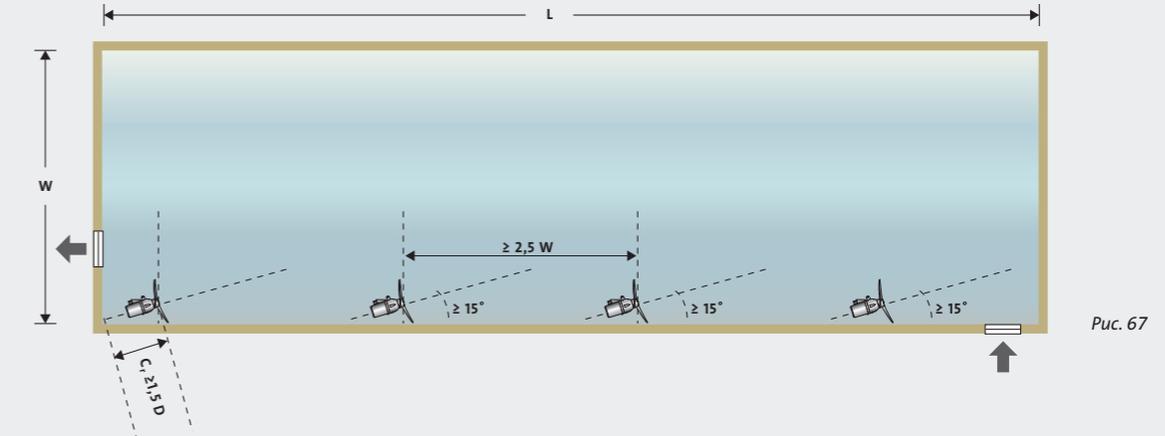


Рис. 67

Образователи потока

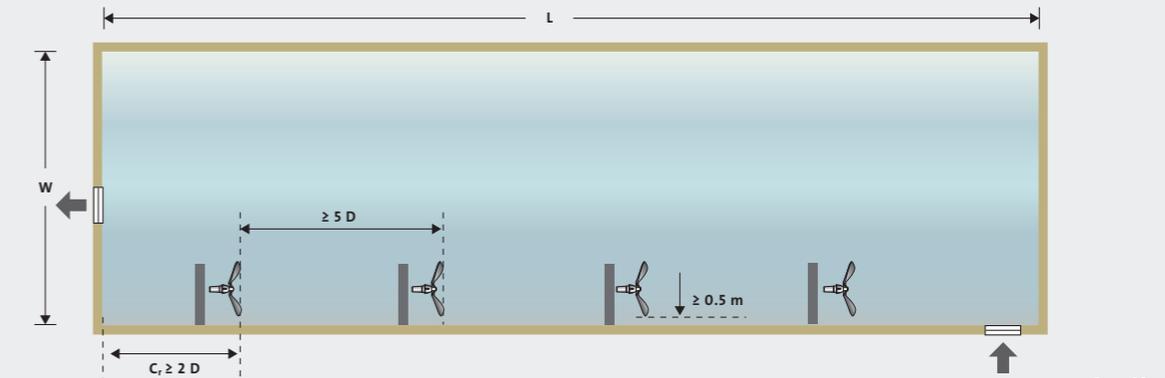


Рис. 68

В случае погружных мешалок необходим наклон к задней стенке под углом минимум 15° . Наклон необходим для минимизации потерь вследствие трения смешивающей струи о стенку. Необходимо также учитывать минимальное расстояние от края лопасти пропеллера до боковой стенки резервуара, равное $0,5D$. См. Рис. 67.

В случае образователей потока необходимо установить рабочие мостки. Как показывает опыт, расстояние между двумя соседними образователями потока должно быть как минимум равно $5D$. Расстояние между краем лопасти пропеллера должно быть не менее 0,5 м, как говорилось ранее. См. Рис. 68.

Цилиндрические резервуары

Установлено одно перемешивающее устройство

И погружные мешалки, и образователи потока необходимо располагать так, как показано на Рис. 69 и 70, то есть под углом $7,5^\circ$ вправо от осевой линии резервуара. При таком варианте расположения происходит полное формирование струи потока с максимально возможным равномерным распределением скоростей по всему объему.

Это обеспечивается при условии, если выдерживаются рекомендуемые расстояния (до задней стенки и до дна), и если учитывается расположение входа и выхода жидкости в резервуаре.

Погружная мешалка

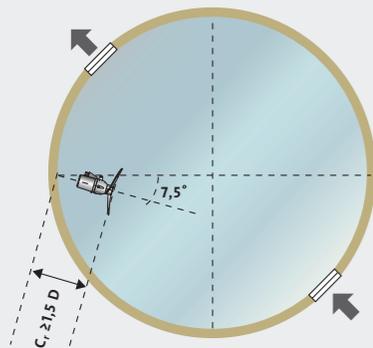


Рис. 69

Образователь потока

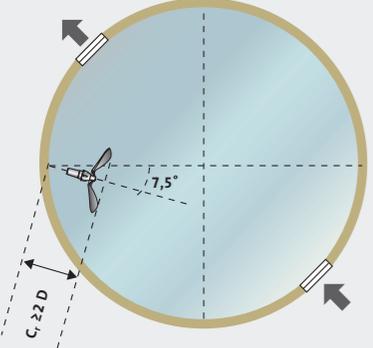


Рис. 70

Установлено два перемешивающих устройства

Правила аналогичны описанным выше, но угол наклона составляет 15° . Эти же правила применяются в том случае, если установлены три и более перемешивающих устройств. См. Рис. 71 и 72.

Погружные мешалки

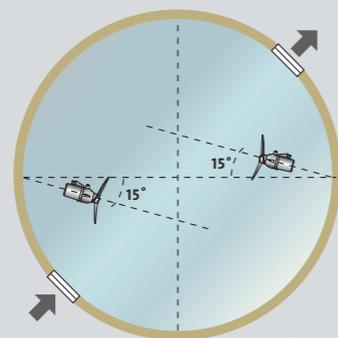


Рис. 71

Образователи потока

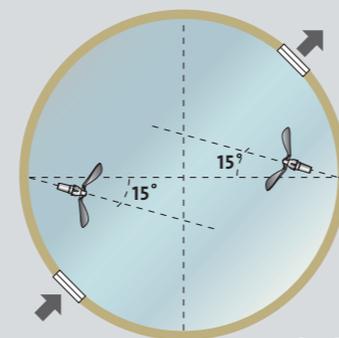


Рис. 72

Альтернативное расположение с двумя погружными мешалками

Если геометрические характеристики резервуара, расположение входа и выхода жидкости, доступность резервуара для осмотра, ремонта и прочих условий позволяет установить рядом друг с другом две погружные мешалки, то угол наклона одной мешалки относительно одной стороны диаметра резервуара должен составлять $7,5^\circ$, а другая мешалка должна располагаться относительно другой стороны диаметра резервуара под углом 30° . Минимальное расстояние между краями пропеллеров должно быть равно диаметру пропеллера D . См. Рис. 73.

Типичными вариантами применения являются крытые резервуары с одним технологическим люком для осмотра и обслуживания или, например, открытые резервуары в случаях, когда по определенным причинам есть только единственный доступ для осмотра и обслуживания.

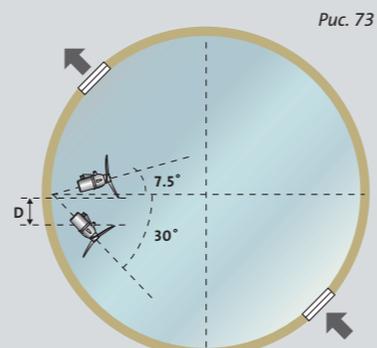


Рис. 73

Погружные мешалки

Циркуляция жидкости в цилиндрических резервуарах

Если требуется определенная циркуляция жидкости, то погружную мешалку или образователь потока можно расположить следующим образом.

В случае жидкостей с большой вязкостью или высокой концентрацией твердых частиц, обеспечивается малая степень гомогенизации, поскольку весь объем резервуара оказывается под областью вращения.

В случае жидкостей с малой вязкостью и низкой концентрацией твердых частиц, можно следовать описанным далее правилам расположения перемешивающего оборудования. Однако при этом следует особо учитывать такие факторы, как формирование центрального завихрения и возможное осаждение твердых частиц в центральной части дна резервуара.

Погружные мешалки и образователи потока должны устанавливаться на расстоянии s_w , которое составляет минимум $0,5$ м и максимум $0,15 d$ от стенки, где d – диаметр резервуара. См. Рис. 74 и 75.

Если по центру резервуара предусмотрен переходный мостик, то образователь потока необходимо устанавливать на расстоянии $0,33 r$ под углом 30° к центру резервуара. Такое расположение обеспечит формирование полной струи. См. Рис. 76.

Диаметр пропеллера D не должен превышать 15% от диаметра резервуара d . Выбор места расположения и ориентация перемешивающих устройств зависит от уровня воды в резервуаре h_w , диаметра пропеллера D и количества мешалок/образователей потока. Следовательно, в каждом случае необходимо тщательно учитывать все факторы.

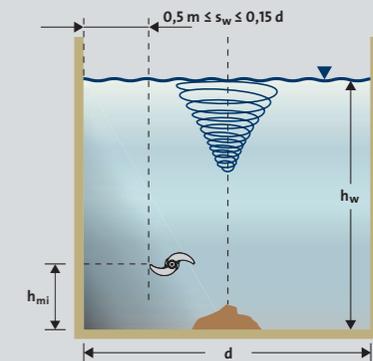


Рис. 74

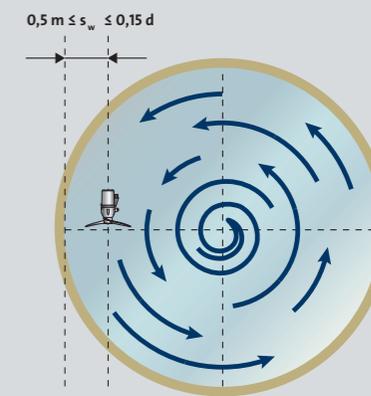


Рис. 75

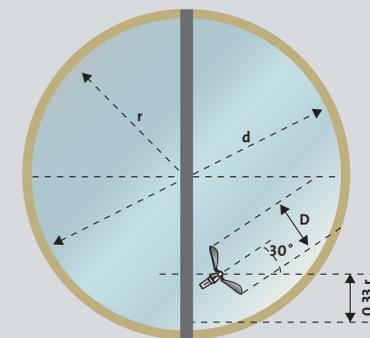


Рис. 76

Канальный резервуар с замкнутым контуром

Введение

Как правило, к резервуарам канального типа с замкнутым контуром относятся:

- a) Окислительные каналы (см. Рис. 77)
- b) Резервуары «змеевидной» формы (известные также как резервуары типа «карусель»), см. Рис. 78
- c) Резервуары в форме кольцевого канала (известные также как кольцеобразные или тороидальные резервуары), см. Рис. 79

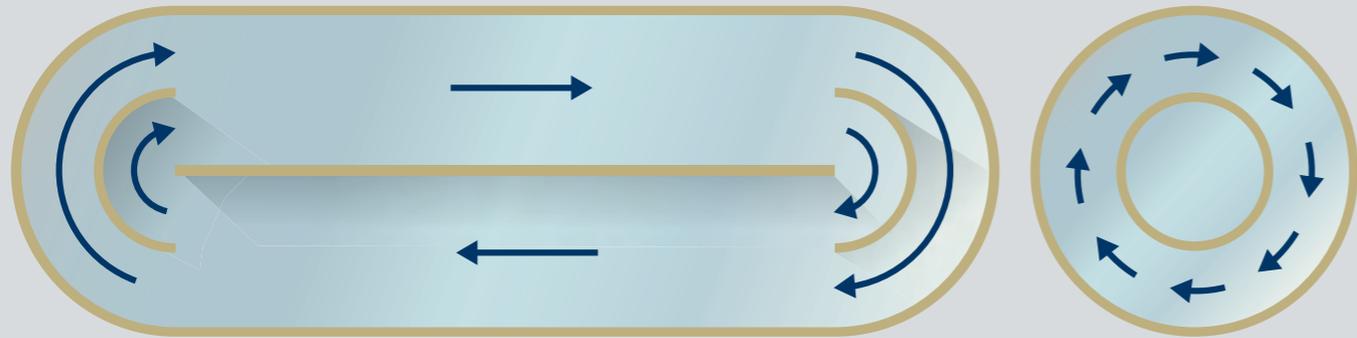


Рис. 77

Рис. 79

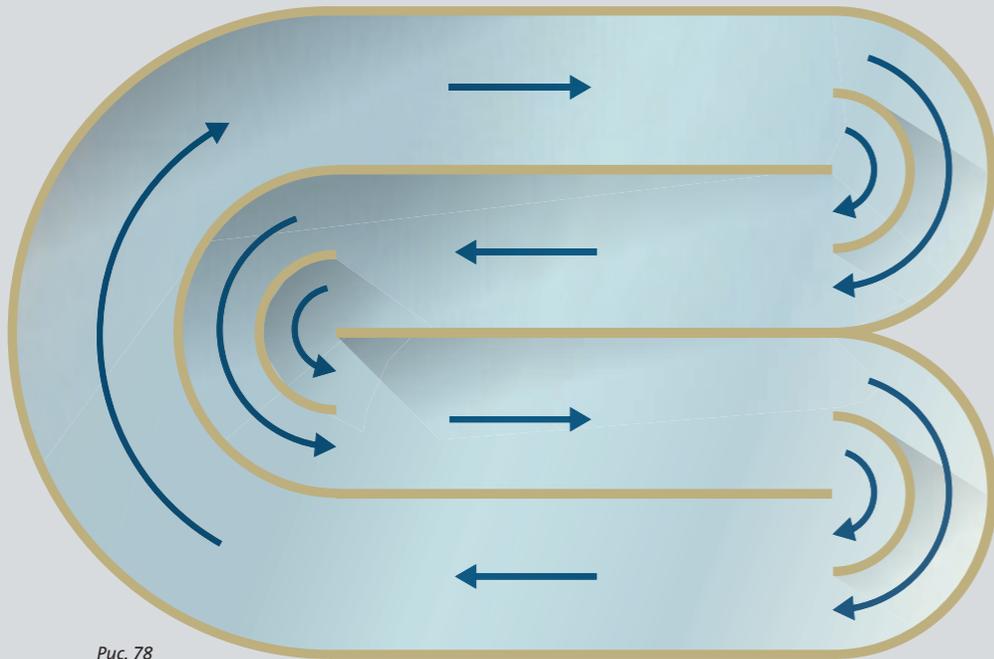


Рис. 78

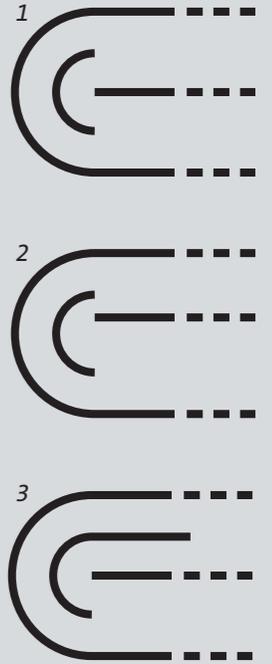
В зависимости от гидравлических условий в резервуарах типа а) и б), закругленные отражательные перегородки могут быть различных типов, например, симметрично расположенные (1), асимметрично расположенные (2), удлиненные (3), а также другие.

Как правило, в резервуарах с замкнутым контуром используются образватели потока. Средняя скорость, создаваемая образвателями потока, должна быть достаточной для того, чтобы удерживать твердые частицы во взвешенном состоянии, обеспечивая однородность среды по всему объему жидкости.

По сравнению с комплектными смесительными резервуарами (квадратными, прямоугольными и цилиндрическими), в которых мешалки или образватели потока создают напряжение сдвига для приведения в движение всего объема жидкости, образватели потока, установленные в резервуарах с замкнутым контуром, создают горизонтальный поток, обеспечивающий циркуляцию жидкости при расчетной средней скорости.

Что касается резервуаров типа а) и б) (см. выше), то размеры горизонтальной отражательной перегородки L_c , уровень воды в резервуаре h_w и ширина канала W (см. Рис. 80) следует выбирать таким образом, чтобы обеспечить необходимую циркуляцию жидкости при минимальном потребном количестве образвателей потока.

Это позволяет создать в канале необходимую среднюю скорость потока при максимально однородном профиле скоростей в любом поперечном сечении канала.

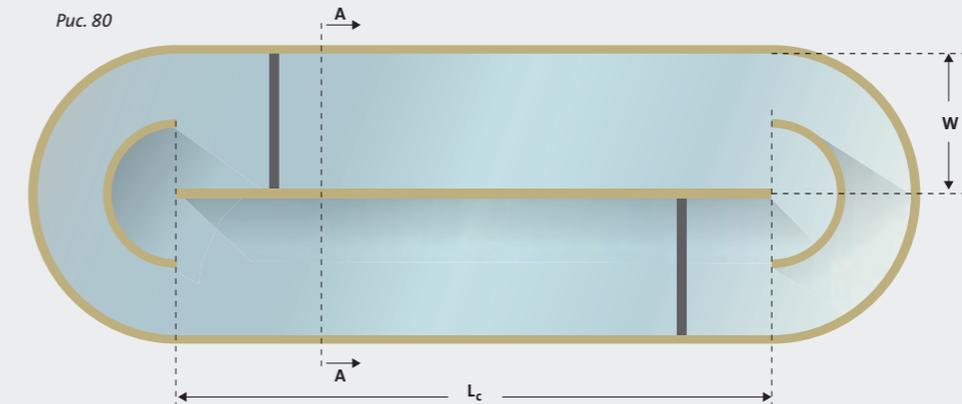


Окислительные каналы: оптимальные размеры

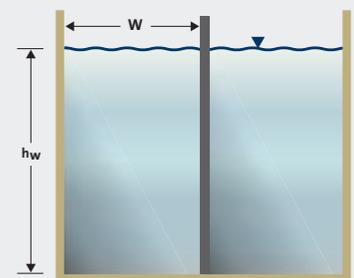
Для окислительных каналов в качестве оптимального варианта предлагаются следующие геометрические размеры:

$L_c \geq 5 W$ $0,8 h_w \leq W \leq 2 h_w$

Рис. 80



Поперечное сечение А-А



В таблице указаны допустимые значения ширины канала **W** при различных значениях уровня воды в резервуаре **h_w**.

h_w [м]	$0,8 h_w \leq W \leq 2 h_w$
2,0	$1,6 \text{ м} \leq W \leq 4,0 \text{ м}$
3,0	$2,4 \text{ м} \leq W \leq 6,0 \text{ м}$
4,0	$3,2 \text{ м} \leq W \leq 8,0 \text{ м}$
5,0	$4,0 \text{ м} \leq W \leq 10,0 \text{ м}$
6,0	$4,8 \text{ м} \leq W \leq 12,0 \text{ м}$
7,0	$5,6 \text{ м} \leq W \leq 14,0 \text{ м}$

Указанный выше диапазон оптимальных геометрических размеров относится также и к резервуарам типа «карусель».

Резервуары в форме кольцевого канала: оптимальные размеры

Что касается резервуаров в форме кольцевого канала (резервуары типа с), то оптимальные геометрические размеры относятся к ширине канала **W**, внутреннему диаметру **D_i** и уровню воды относительно дна резервуара **h_w**. См. Рис. 81.

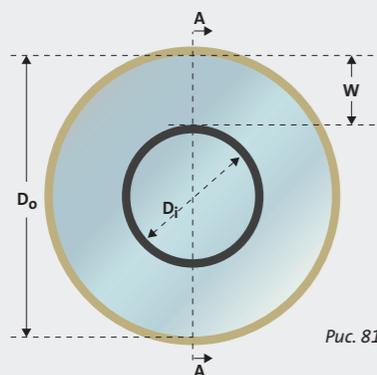
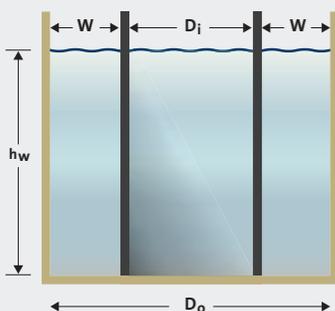


Рис. 81

Поперечное сечение А-А



$$W \geq D_i$$

$$0,8 h_w \leq W \leq 2 h_w$$

Расположение перемешивающего оборудования в окислительных каналах и резервуарах типа «карусель»

Для сохранения механической надежности образатели потока должны располагаться таким образом, чтобы обеспечивалось максимально однородное распределение скоростей.

Когда образатели потока необходимо устанавливать в закрытых зонах криволинейных секций резервуара в месте предполагаемых переходных мостиков для осмотра и обслуживания, то велик риск серьезных механических повреждений – в первую очередь, компонентов устройства, ступицы пропеллера и подшипников, а также монтажного оборудования. Это объясняется неравномерным распределением скоростей воды в криволинейных секциях резервуара, что приводит к появлению на выходе из каждой криволинейной секции вращающих пар сил, воздействующих на пропеллер. См. Рис. 82 и 83.



Рис. 82

Крутящий/вращающий момент может вызвать:

- Периодическую изнурительную нагрузку на лопасти пропеллера
- Изнурительную нагрузку на ступицу пропеллера
- Нагрузку, передающуюся на подшипники редуктора
- Вибрацию конструкции установки (направляющая стойка и подъемное устройство) с последующей поломкой крепежных элементов

Расстояние до криволинейной торцевой стенки позади пропеллера

Одним из жестких требований является соблюдение нормированного расстояния от криволинейной стенки резервуара до задней части пропеллера.

Десятилетия практических наблюдений показывают, что в тех случаях, когда периодически происходит серьезное повреждение установленного оборудования, необходимое расстояние **C** до криволинейной торцевой стенки резервуара позади пропеллера должно быть как минимум равно большему из двух значений – ширине канала **W** и уровню воды **h_w**, как показано на Рис. 84: $C \geq W$ и h_w .

Кроме того, образатели потока не следует располагать слишком близко к поперечному сечению начала закругленной секции канала, так как и сама по себе закругленная секция, и закругленная отражательная перегородка могут вызывать сильную турбулентность и противоток, направленный к пропеллерам.

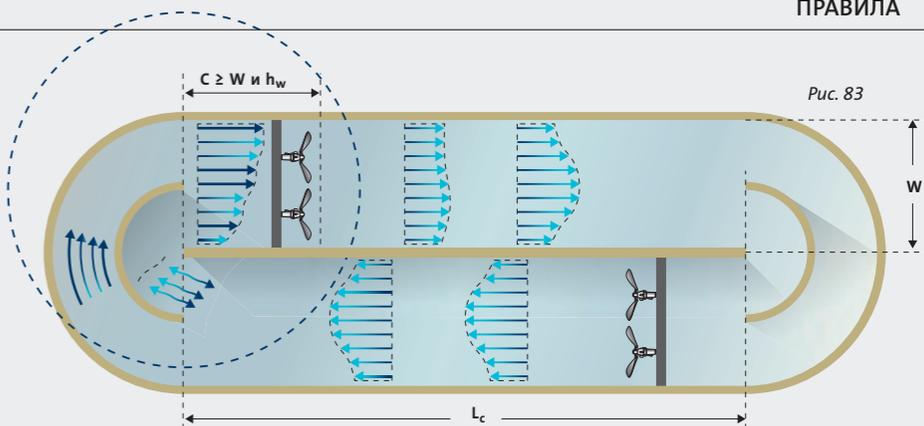


Рис. 83

Приведенные далее результаты CFD моделирования подтверждают обоснованность правила, согласно которому минимальное расстояние **C** между пропеллером образателя потока и криволинейной торцевой секцией окислительного канала должно быть больше или равно большему из значений **W** и **h_w**.

Характеристики окислительного канала:

Длина канала L_c	87,7 м
Ширина канала W	6,5 м
Уровень воды в резервуаре h_w	5,5 м
Высота стенки	6,0 м
Приток сточных вод	539 м ³ /ч
Требуемая скорость потока	0,3 м/с
Общее процентное содержание твердых частиц	0,5 %

Система аэрации не установлена

Требуемое осевое усилие (включая запас надежности 5%)	4257 Н
Расчетное кол-во и модели образателей потока:	2 шт. x AFG.37.180.46
Суммарное осевое усилие:	5224 Н

Расположение пропеллера относительно криволинейной торцевой секции:

Минимальное допустимое расстояние:	6,5 м
Недопустимое расстояние	3,0 м (см. рис. 85)

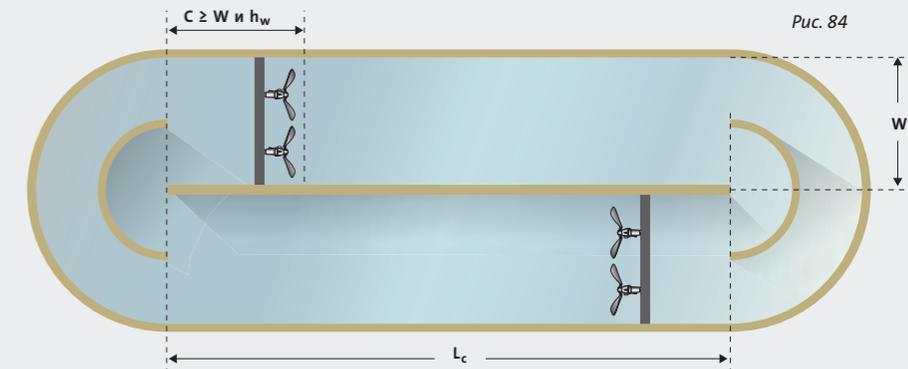


Рис. 84

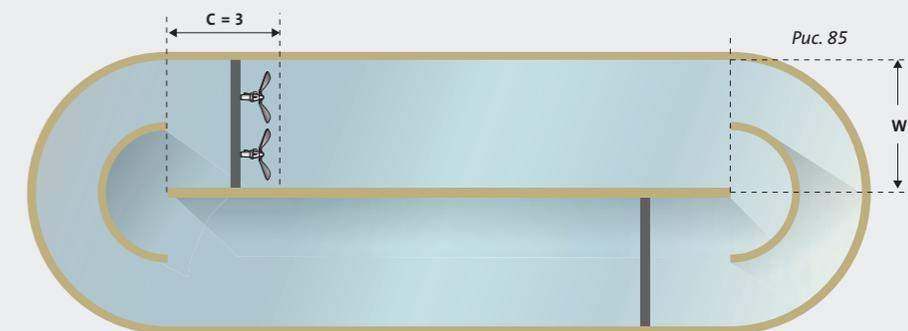
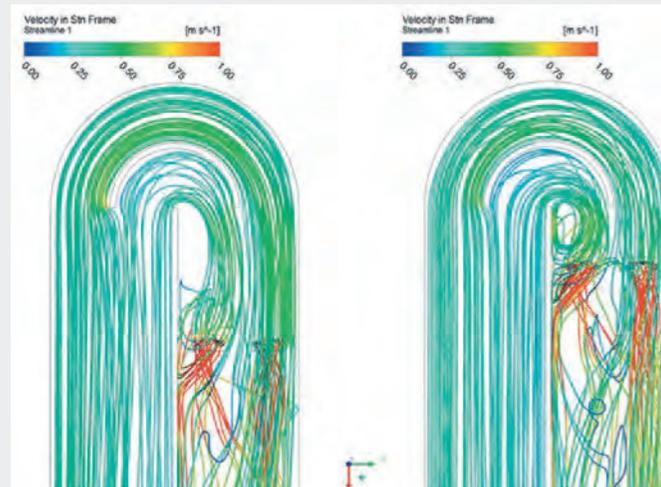


Рис. 85

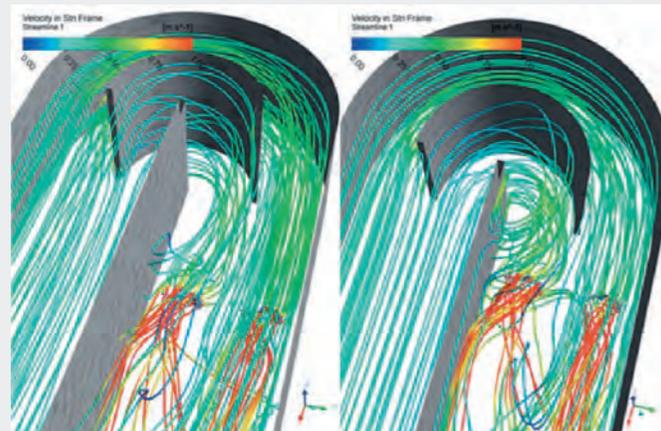
Результаты CFD моделирования:

СРАВНЕНИЕ РЕЖИМОВ ПОТОКА



правильное расположение

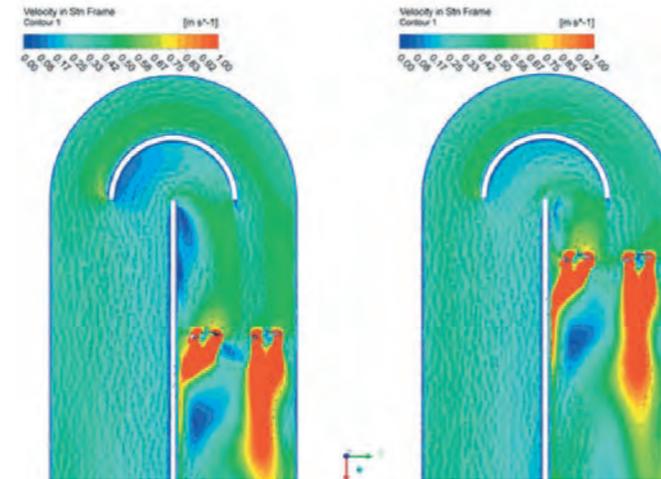
неправильное расположение



правильное расположение

неправильное расположение

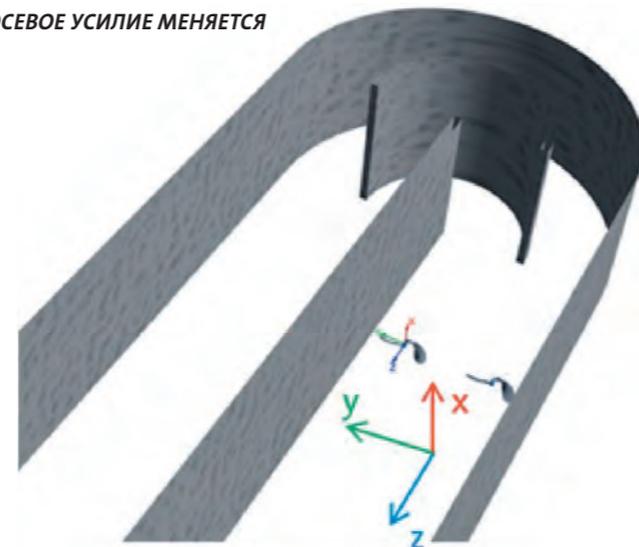
СРАВНЕНИЕ ГРАФИКОВ СКОРОСТЕЙ



правильное расположение

неправильное расположение

ОСЕВОЕ УСИЛИЕ МЕНЯЕТСЯ

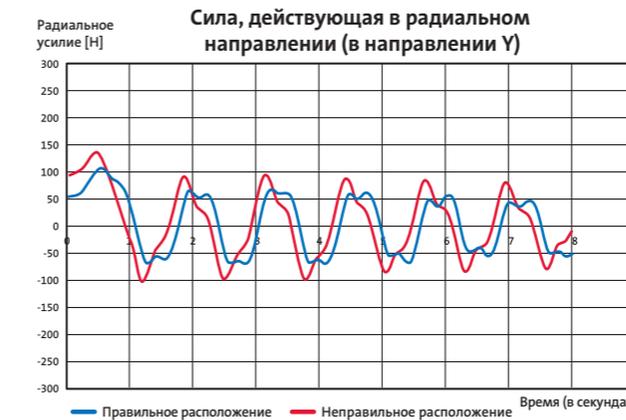
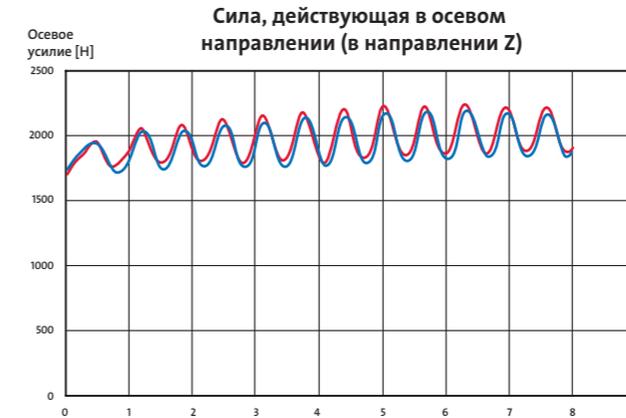


КОМПАНИЯ GRUNDFOS ИСПОЛЬЗУЕТ CFD МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРИМЕНИМОСТИ СВОЕГО ОБОРУДОВАНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ПРОЦЕССАХ НА ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ.

При сравнении результатов CFD моделирования очевидно, что если образватели потока расположены неправильно, то есть слишком близко к криволинейной торцевой секции, то при их эксплуатации очень высок риск механических повреждений вследствие несбалансированности потока до перемешивающего оборудования.

В свою очередь, при правильном расположении перемешивающего оборудования риск повреждений значительно сокращается благодаря практически полностью сбалансированному потоку до перемешивающего устройства и, как следствие, улучшенным эксплуатационным характеристикам оборудования.

На графиках слева показаны колебания значений усилий в осевом направлении (Z) и в радиальных направлениях (X, Y) в зависимости от того, правильно или неправильно расположены образватели потока. На каждом графике видно, что неправильное расположение относительно криволинейной торцевой перегородки (изгиба резервуара) приводит к существенным колебаниям усилия (красные линии), что в свою очередь может стать причиной серьезных механических повреждений образвателя потока и монтажных принадлежностей, не говоря уже о существенном и прогрессирующем ухудшении эксплуатационных характеристик оборудования.



Минимальное расстояние до края продольной перегородки

Минимальное расстояние D_c от кромки лопасти пропеллера образвателя потока до края продольной перегородки должно как минимум в два раза превышать ширину канала W . См. Рис. 86.

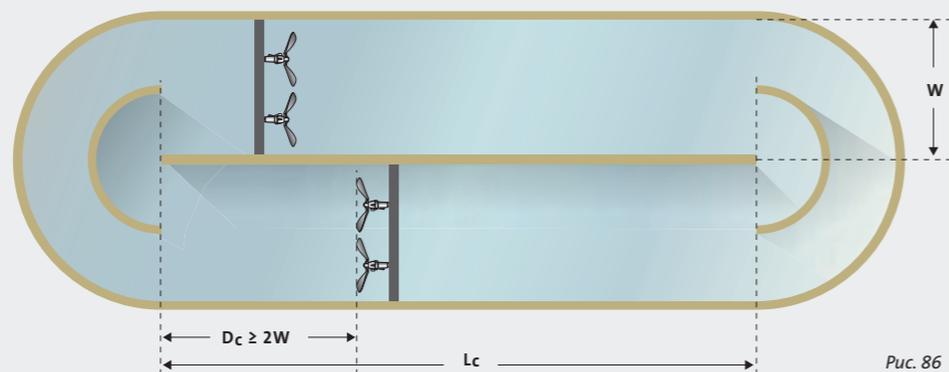


Рис. 86

Оптимальное расположение

По возможности, образватели потока необходимо размещать на середине длины канала L_c , т. е. на расстоянии от криволинейной секции канала $D_c = 0,5 L_c$. См. Рис. 87.

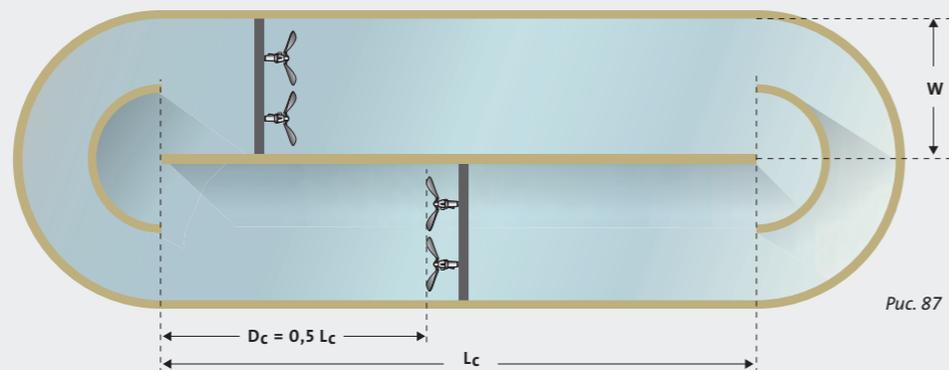


Рис. 87

При таком расположении струя от пропеллера формируется полностью и горизонтальный поток генерируется с минимальной турбулентностью.

Последовательное расположение образвателей потока

В том случае, если в канале образватели потока необходимо расположить последовательно, то расстояние D_s между пропеллерами должно как минимум в пять раз превышать диаметр пропеллера D . См. Рис. 88.

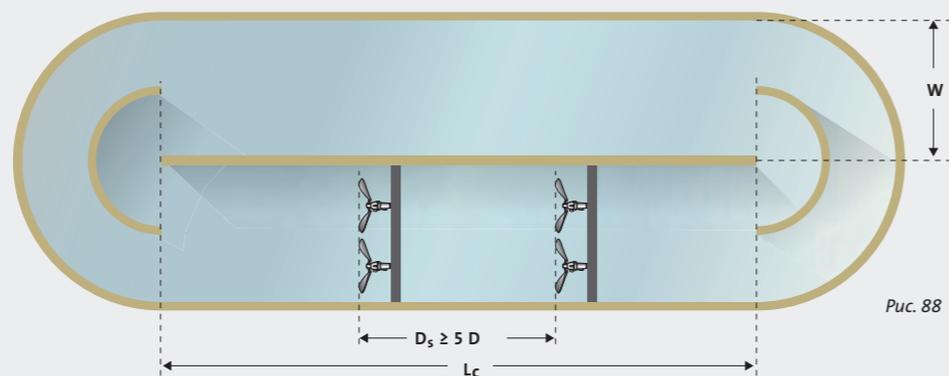


Рис. 88

Прямоугольные окислительные каналы

Все правила и рекомендации, указанные выше, распространяются на окислительные каналы и резервуары «карусельного типа», а также на окислительные каналы с краями прямоугольной формы (см. Рис. 89).

Специфика расположения перемешивающего оборудования в прямоугольных окислительных каналах

Несмотря на гидравлические потери в концах резервуара, кольцевые резервуары иногда проектируют в виде прямоугольных резервуаров, имеющих только горизонтальную продольную перегородку.

Отсутствие торцевых изогнутых перегородок приводит к особому требованию, касающемуся минимальной длины горизонтального участка L_1 перед краем лопасти пропеллера. Это расстояние должно как минимум в 12 раз превышать диаметр пропеллера D , т. е. $L_1 \geq 12 D$. См. рис. 90.

При несоблюдении данного правила в конце канала может возникать сильный противоток, а большое количество кинетической энергии, которая должна идти на создание горизонтального потока, рассеивается впустую.

Что касается необходимого расстояния C от кромки лопасти пропеллера до края продольной горизонтальной перегородки канала, рекомендованной длины горизонтальной продольной перегородки L_c и ширины канала W , то все требования такие же, как и для окислительных каналов, описанных выше.



Рис. 89

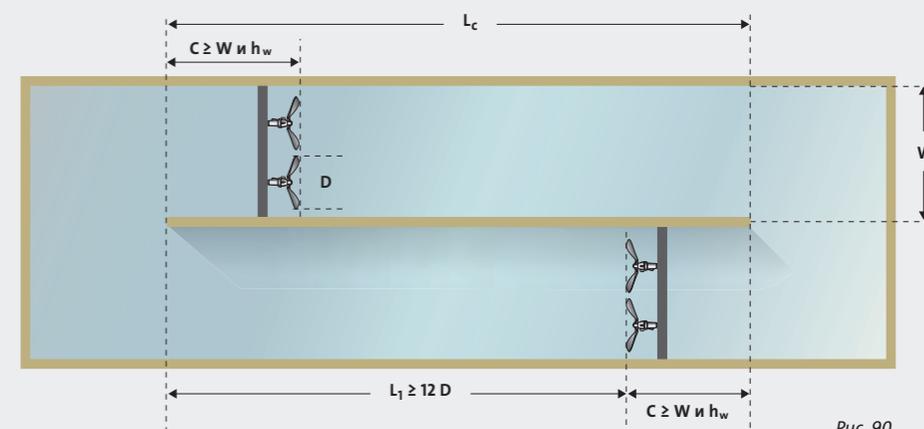


Рис. 90



Расстояние между соседними мешалками и образозателями потока в резервуарах в форме кольцевого канала

В принципе, в кольцевых резервуарах можно устанавливать как мешалки, так и образозатели потока. В любом случае предпочтительным вариантом являются образозатели потока благодаря крайне низкому энергопотреблению, созданию спокойного горизонтального потока, высоким значениям расхода и осевого усилия.

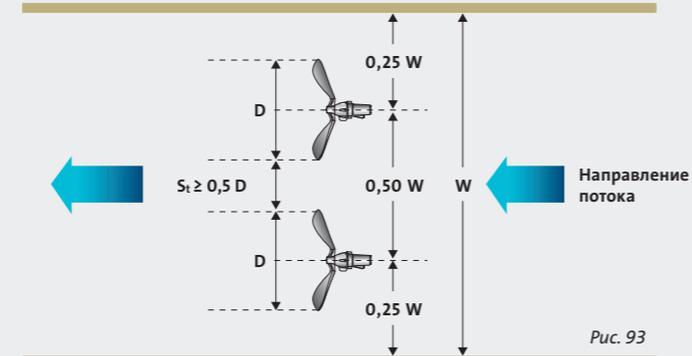
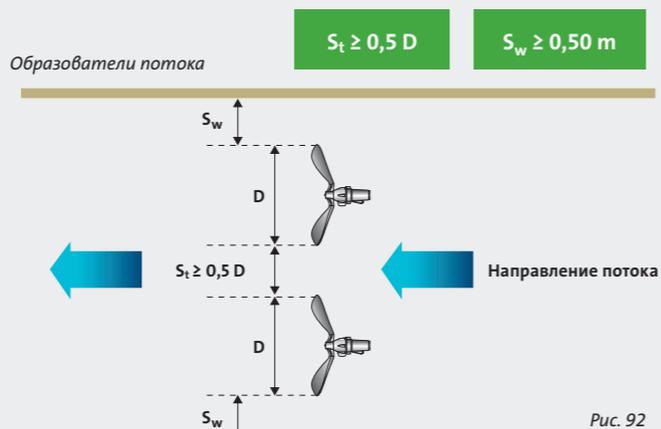
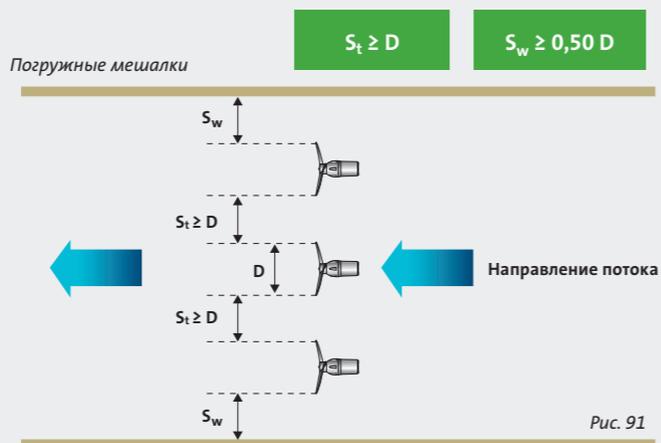
Тем не менее, как видно на Рис. 91 и 92, чтобы избежать локальных турбулентностей, гидравлических потерь, вибраций из-за локальных противотоков и прочих негативных последствий, необходимо соблюдать не только минимальное расстояние S_w между краями лопастей соседних пропеллеров, но и минимальное расстояние от стенок резервуара до края лопасти пропеллера.

Если ширины канала вполне хватает для того, чтобы выдержать все указанные выше минимальные расстояния, то главной задачей становится равномерное распределение погружных мешалок и образозателей потока.

На Рис. 93, к примеру, расстояние между осевыми линиями образозателей потока равно 50% от ширины канала, а расстояние от стенки – 25% от ширины канала.

Выполнение требований, установленных данными правилами, позволяет избежать участков с чрезмерным количеством работающих пропеллеров, а также монтажных конструкций, которые могут стать препятствием для поступающего потока, который может вызвать большой перепад давления на участках до и после пропеллеров, приводящий к турбулентному и неравномерному потоку.

ОБРАЗОВАТЕЛИ ПОТОКА ЯВЛЯЮТСЯ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНЫМ ВАРИАНТОМ БЛАГОДАРЯ НИЗКОМУ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЮ, ВЫСОКОМУ РАСХОДУ И ВЫСОКОЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ, ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ СООТНОШЕНИЕМ ОСЕВОГО УСИЛИЯ К ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ R_{FP}



Расположение в кольцевых (кольцеобразных или тороидальных) резервуарах

Кольцевые резервуары характеризуются постоянной разницей между значениями скорости потока по внутренней и внешней окружности в любом поперечном сечении канала во время потока воды. См. Рис. 94.

Чтобы минимизировать эффект неравномерного распределения скорости, при установке образозателей потока очень важно соблюдать правильный угол наклона в горизонтальной проекции в тех случаях, когда установлен один образозатель потока (в отличие от ситуациями, когда установлены дополнительные устройства ближе к внешней стенке канала).

В иных случаях (и в особенности в ситуациях, когда установлены несколько образозателей потока) балансировку динамической конфигурации можно обеспечить за счет дооснащения образозателей потока частотно-регулируемым электроприводом: благодаря переменной частоте вращения одних и тех же пропеллеров осевое усилие на «внутренних» образозателях потока по сравнению с «внешними» было бы разным. При этом поток был бы значительно более однородным.

Установлен один образозатель потока

Образозатель потока должен устанавливаться на расстоянии $0,5 W$ от внутренних стенок (где W – ширина канала) под углом от $7,5^\circ$ до $22,5^\circ$ к центру резервуара. См. Рис. 95. Такое расположение обеспечивает полное формирование струи образозателем потока.

Установлено несколько образозателей потока

Если установлено несколько образозателей потока, то правильное расположение определяется в каждом конкретном случае с учетом ширины канала, количества перемешивающих устройств, радиуса изгиба канала и уровня воды в резервуаре. На Рис. 96 показаны общие правила расположения в случае, когда два образозателя потока установлены в одном и том же поперечном сечении канала.

Задача состоит в том, чтобы выдерживались расстояния от стенок канала S_w и расстояния между краями лопастей пропеллеров S_t .

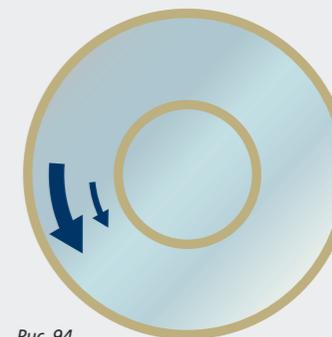


Рис. 94

Установлен один образозатель потока

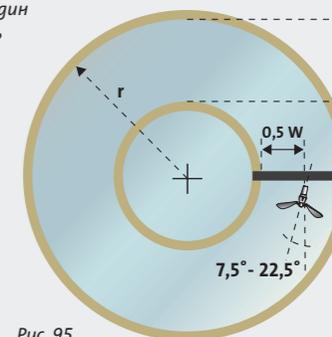


Рис. 95

Установлено несколько образозателей потока

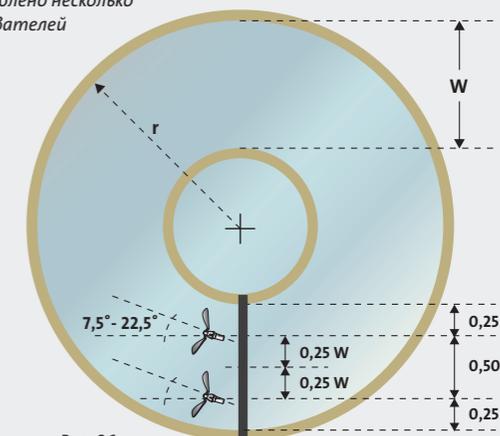


Рис. 96

Общие правила размещения для аэрируемых резервуаров

ВВЕДЕНИЕ

Частым требованием является установка погружных мешалок и образователей потока в аэрируемых резервуарах, чтобы обеспечить выполнение разнообразных требований к определенным технологическим процессам с периодическим включением и отключением аэрации.

Необходимо учитывать следующие требования:

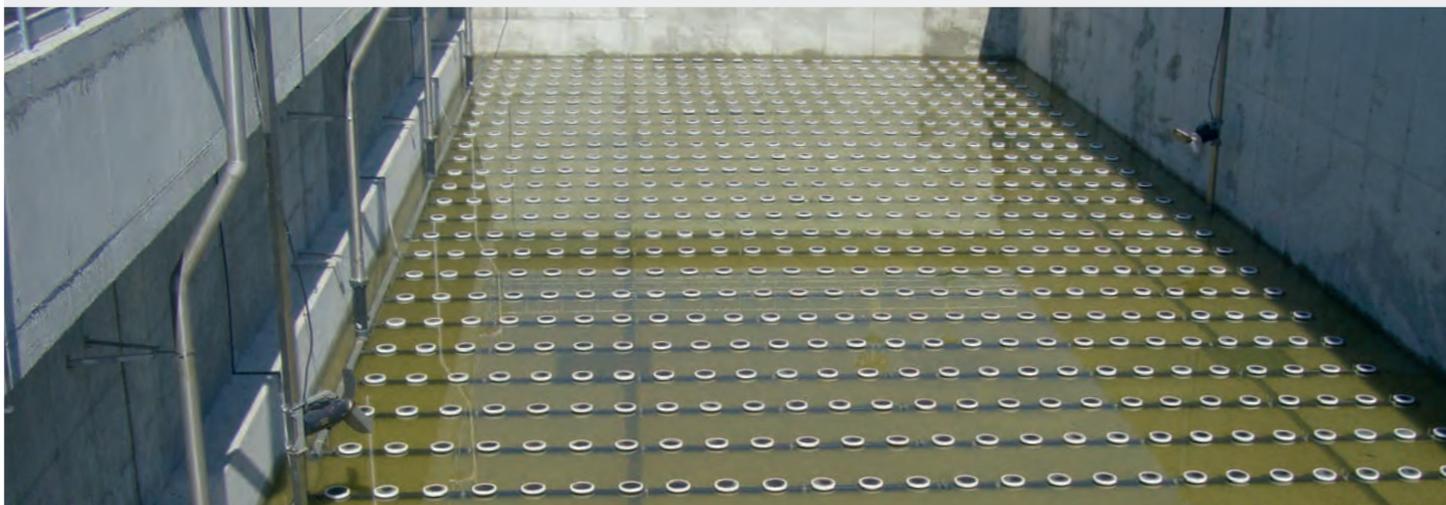
- В случае квадратных, прямоугольных или цилиндрических резервуаров, в которых поочередно происходят процессы денитрификации/нитрификации, а в придонной части установлена система дисковых диффузоров для пузырьчатой аэрации, погружные мешалки или образователи потока работают во время цикла денитрификации, обеспечивая удержание твердых частиц во взвешенном состоянии и гомогенизацию потока.

Кроме решения определенных технологических задач, в этом случае правильное расположение погружных мешалок или образователей потока в вертикальной и горизонтальной плоскостях позволяет предотвратить механические повреждения как компонентов системы аэрации, так и самих перемешивающих устройств.

- В случае канальных резервуаров с замкнутым контуром, в которых происходят только процессы окисления/нитрификации или денитрификации/нитрификации, а дно резервуаров частично покрыто системой мелкопузырчатой аэрации, обычно устанавливаются образователи потока. Образователи потока в этом случае создают горизонтальный поток и удерживают твердые частицы во взвешенном состоянии; при этом система аэрации работает в циклическом режиме (см. выше).

Правильное расположение образователей потока в горизонтальной плоскости относительно системы аэрации позволяет исключить механическое повреждение пропеллеров и прочих компонентов перемешивающего оборудования из-за возможного устойчивого противотока из-за воздушного барьера, образованного поднимающимися со дна пузырьками воздуха, а также любые повреждения компонентов аэрации.

Тесное сотрудничество с заказчиком (проектировщиком, конечным пользователем, эксплуатирующей организацией или подрядчиком) необходимо для того, чтобы довести сведения до всех причастных лиц правила Grundfos, которые следует выполнять при определении расположения погружных мешалок и образователей потока в сочетании с системой аэрации. Если предлагаемые правила не соблюдаются, то компания Grundfos снимает с себя всякую ответственность за любые повреждения перемешивающего оборудования и системы аэрации, а также за уменьшение эффективности переноса кислорода.



ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ ПОГРУЖНЫХ МЕШАЛОК И ОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОТОКА

Погружные мешалки в полностью аэрируемых квадратных, прямоугольных или цилиндрических резервуарах

Когда в квадратных, прямоугольных или цилиндрических резервуарах поочередно происходят такие процессы, как денитрификация/нитрификация, минимальное расстояние h_D по вертикали от края пропеллера погружной мешалки и дисковыми (трубными или иными) диффузорами должно быть не менее чем в 2,5 раза больше диаметра пропеллера D .

Для предотвращения повреждений системы диффузоров рекомендуется устанавливать погружные мешалки под углом минимум 5° к поверхности воды. См. Рис. 97, 98 и 99.

Наклонное положение погружных мешалок требуется из соображений безопасности, поскольку в таком положении обеспечивается целостность компонентов системы аэрации. Что касается использования перемешивающего оборудования для процессов денитрификации, то если из-за наклона струи на поверхности воды образуется сильная турбулентность, то угол наклона можно уменьшить до нуля.

 $h_d \geq 2,5 \times D$

Рис. 97



Рис. 98

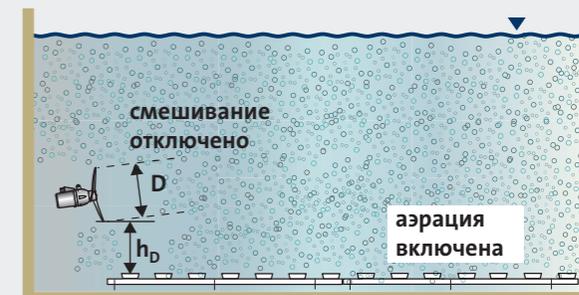
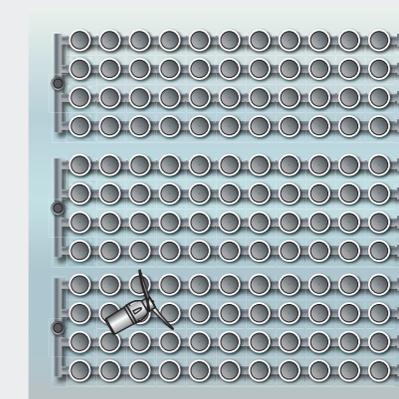


Рис. 99



Если погружные мешалки необходимо разместить рядом с системой дисковых диффузоров (то есть расстояние по вертикали h_D меньше или равно $2,5 \times D$ из-за особых требований заказчика/конечного пользователя/проектировщика или по иным причинам), то необходимо обеспечить свободную от диффузоров зону перед мешалкой и вокруг нее. Такое расположение позволит предотвратить повреждение системы аэрации, при этом эффективность перемешивания останется прежней. См. Рис. 100.

Размер свободной от диффузоров зоны определяется свободным пространством перед пропеллером C_D и значениями расстояния L_1 и L_2 . См. Рис. 102.

Эти значения необходимо согласовать с разработчиком системы аэрации, принимая во внимание фактическую конфигурацию резервуара, компоновку сеток диффузоров и осевое усилие, создаваемое мешалкой.

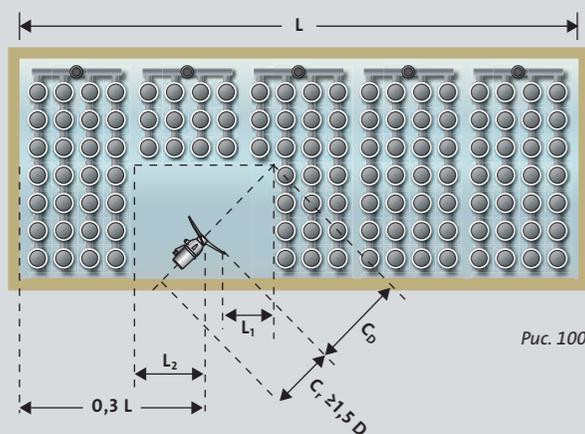


Рис. 100

Образователи потока в полностью аэрируемых квадратных, прямоугольных или цилиндрических резервуарах

В тех случаях, когда образователи потока устанавливаются в квадратных, прямоугольных или цилиндрических резервуарах, где происходят поочередные процессы, то между краем лопасти пропеллера и дисковыми диффузорами необходимо выдерживать минимальное расстояние $\geq 0,5 \times D$. См. Рис. 101.

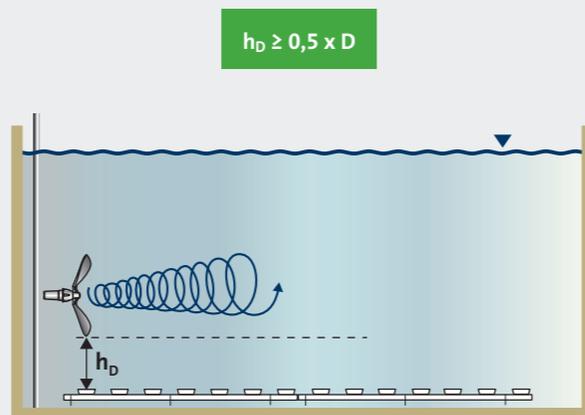


Рис. 101

В тех же случаях, когда образователи потока необходимо установить на минимальном расстоянии от края лопастей пропеллера до дна резервуара, то есть на указанном выше расстоянии $h_{min} = 0,5$ м, необходимо обеспечить свободную от диффузоров зону перед перемешивающим устройством и вокруг него. Такое расположение позволит предотвратить повреждение системы аэрации, при этом эффективность перемешивания останется прежней.

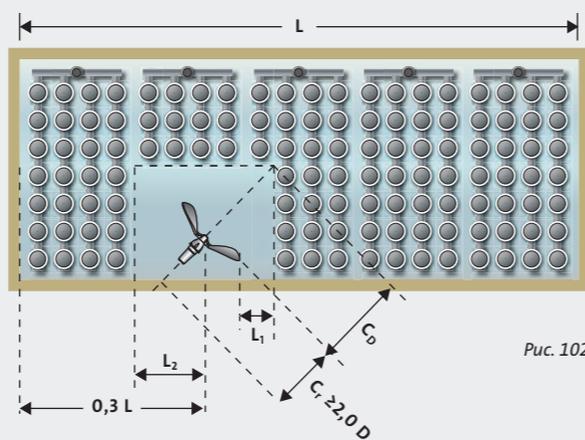


Рис. 102

Аэрируемые цилиндрические резервуары, оснащенные образователями потока

Когда образователи потока устанавливаются в цилиндрических резервуарах, где происходят поочередные процессы, то, как и в случае с квадратными/прямоугольными резервуарами, между краем лопасти пропеллера и дисковыми диффузорами необходимо выдерживать указанное выше минимальное расстояние $h_D \geq 0,5 \times D$.

В тех же случаях, когда образователи потока необходимо установить на минимальном расстоянии от края лопастей пропеллера до дна резервуара, то есть на расстоянии $h_{min} = 0,50$ м, необходимо обеспечить свободную от диффузоров зону перед образователями потока и вокруг них. Такое расположение позволит предотвратить повреждение системы аэрации, при этом эффективность перемешивания останется прежней.

Размер свободной от диффузоров зоны определяется свободным пространством перед ближайшим пропеллером C_D . Кроме того, необходимо выдерживать расстояние позади пропеллера $C_r \geq h_w$. См. Рис. 103.

Значение C_D необходимо согласовать с разработчиком системы аэрации, принимая во внимание фактическую конфигурацию резервуара и компоновку сеток диффузоров.

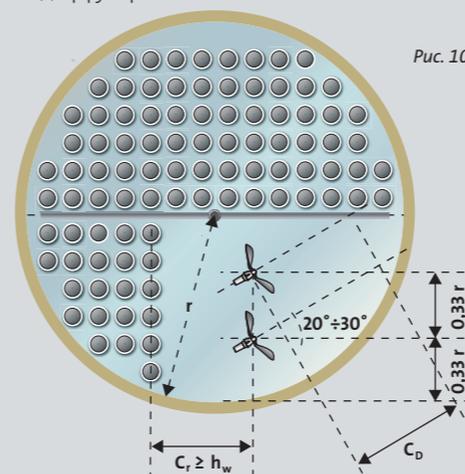
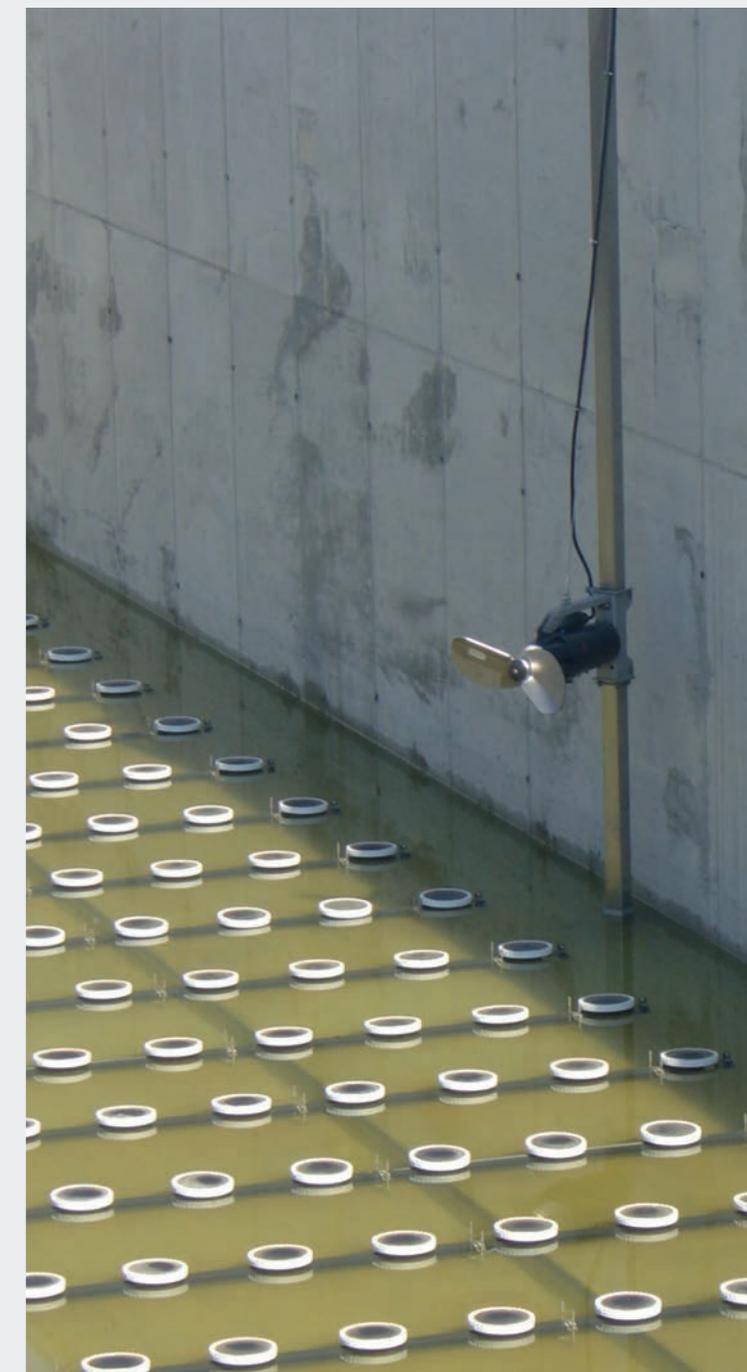
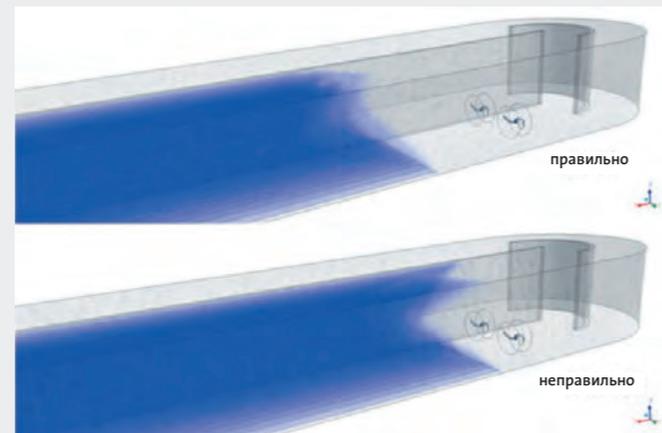


Рис. 103

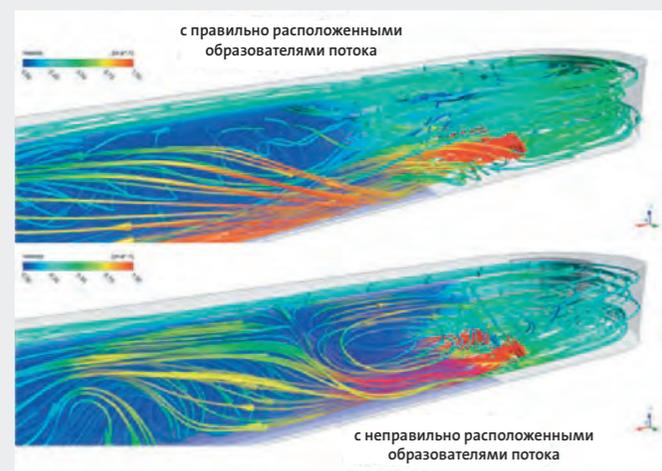


Результаты CFD моделирования были следующими:

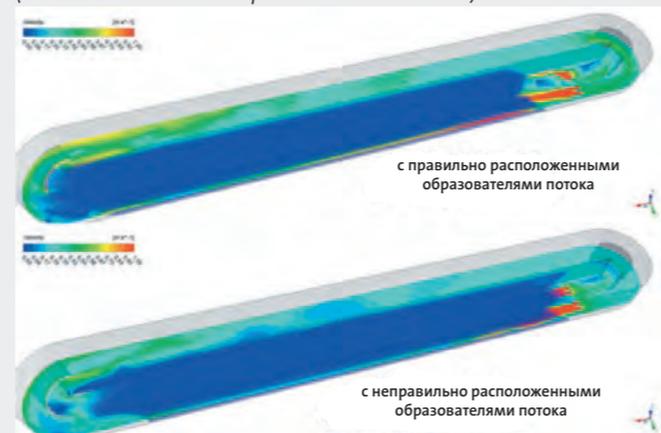
СРАВНЕНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЙ ОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОТОКА



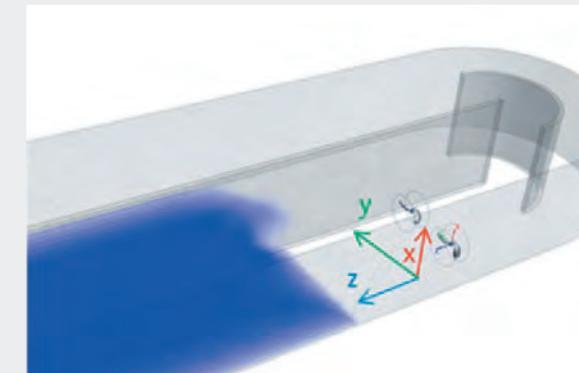
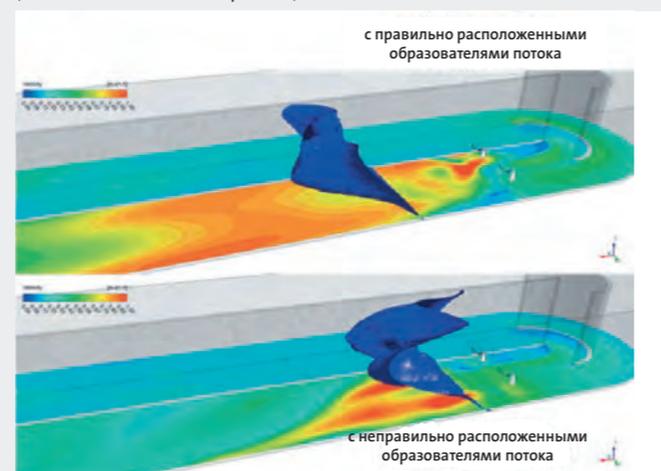
СРАВНЕНИЕ РЕЖИМОВ ПОТОКА



СРАВНЕНИЕ ГРАФИКОВ СКОРОСТЕЙ
(в осевой плоскости образовательно потока)

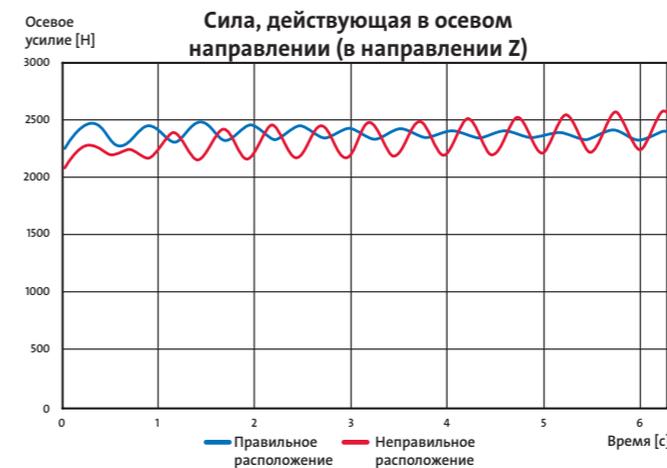


СРАВНЕНИЕ ГРАФИКОВ СКОРОСТЕЙ
(в плоскости зоны аэрации)



При сравнении результатов CFD моделирования очевидно, что если образовательно потока расположены неправильно, то есть слишком близко к первому ряду диффузоров, то при эксплуатации образовательно потока очень высок риск механических повреждений в результате формирования устойчивого противотока.

Напротив, при правильном расположении образовательно потока риск таких повреждений существенно уменьшается. Как видно на графике слева, колебания значений усилия (красные линии) в радиальном направлении X и осевом направлении Z становятся очевидными в тех случаях, когда образовательно потока размещены слишком близко к барьеру, образованному поднимающимися пузырьками воздуха.



ПРИМЕР ИЗ ПРАКТИКИ: ФОРМИРОВАНИЕ ПРОТИВОТОКА – CFD МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПАРКА LA FEYSSINE-LYON WWTP

Процесс очистки активным илом на очистных сооружениях парка La Feysine-Lyon происходит в окислительном канале, оснащённом системой мелкопузырчатых дисковых диффузоров диаметром 9 дюймов производства Grundfos и образователями потока AFG. Глубина воды составляет 8,7 м. Моделирование методами CFD выполнялось для двух технологических условий: аэрация при производительности 50% (см. Рис. 107) и аэрация при производительности 100% (см. Рис. 108).

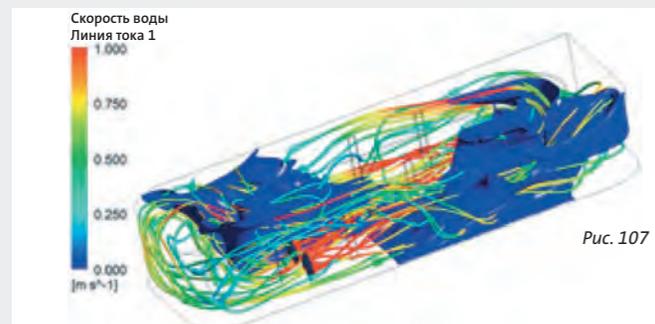


Рис. 107

Аэрация при производительности 50%, ограниченный противоток



Рис. 108

Аэрация при производительности 100%, существенный противоток

Приведенные выше результаты моделирования показывают, что при нормальном режиме эксплуатации риск формирования противотока весьма невелик, но если система работает на полную мощность, то происходит формирование устойчивого противотока.

НЕХВАТКА СВОБОДНОГО МЕСТА: ЧТО ДЕЛАТЬ?

В некоторых случаях, когда требуется высокая плотность установки диффузоров, имеющейся площади дна резервуара может быть недостаточно, чтобы установить сетки диффузоров в запроектированной компоновке.

В таких ситуациях предлагаются следующие решения:

- 1) За минимальное расстояние C_M между последним рядом диффузоров и краем прямолинейной перегородки канала может приниматься расстояние $\leq h_w$
- 2) За расстояние C_F от края лопастей пропеллера образвателей потока до первого ряда диффузоров может приниматься расстояние, равное W/n , где n – количество образвателей потока в поперечном сечении канала; при этом в любом случае расстояние C_F должно быть $\geq h_w$.

По возможности, с проектировщиком сооружений очистки сточных вод необходимо согласовать правила размещения оборудования в таких особых ситуациях.

Тем не менее, в определенных условиях эксплуатации (высокий уровень воды в резервуаре, невозможность выдерживать надлежащее расстояние до воздушного барьера перед перемешивающим устройством и т. д.) полностью исключить формирование противотока невозможно.

Найти решение для минимизации негативных последствий противотока можно только в том случае, если правильно выбрать количество и модель образвателей потока, дополнить их по мере необходимости частотно-регулируемым электроприводом, изменить компоновку системы аэрации (расход воздуха для каждого диффузора, изменение компоновки сеток диффузоров) и выполнить моделирование методами CFD.

РАЗМЕЩЕНИЕ ОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОТОКА В АЭРИРУЕМЫХ РЕЗЕРВУАРАХ В ФОРМЕ КОЛЬЦЕВОГО КАНАЛА

В том случае, если образватели потока устанавливаются надлежащим образом, в соответствии с вышеприведенными правилами, то при размещении образвателей потока в аэрируемых резервуарах в форме кольцевого канала необходимо, чтобы расстояние C_F от ближайшего пропеллера до первого ряда диффузоров было как минимум равно большему из двух значений – ширине канала W и уровню воды в резервуаре h_w . Расстояние C_F необходимо измерять так, как показано на Рис. 109.

Расстояние C_R до первого ряда диффузоров позади ближайшего пропеллера должно быть как минимум равно уровню воды в резервуаре h_w .

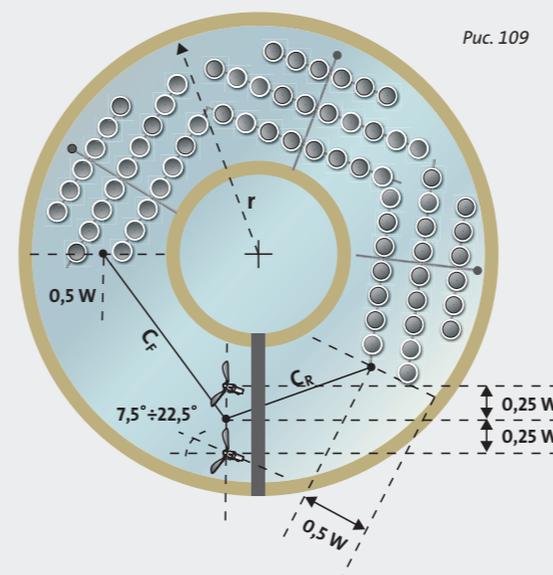
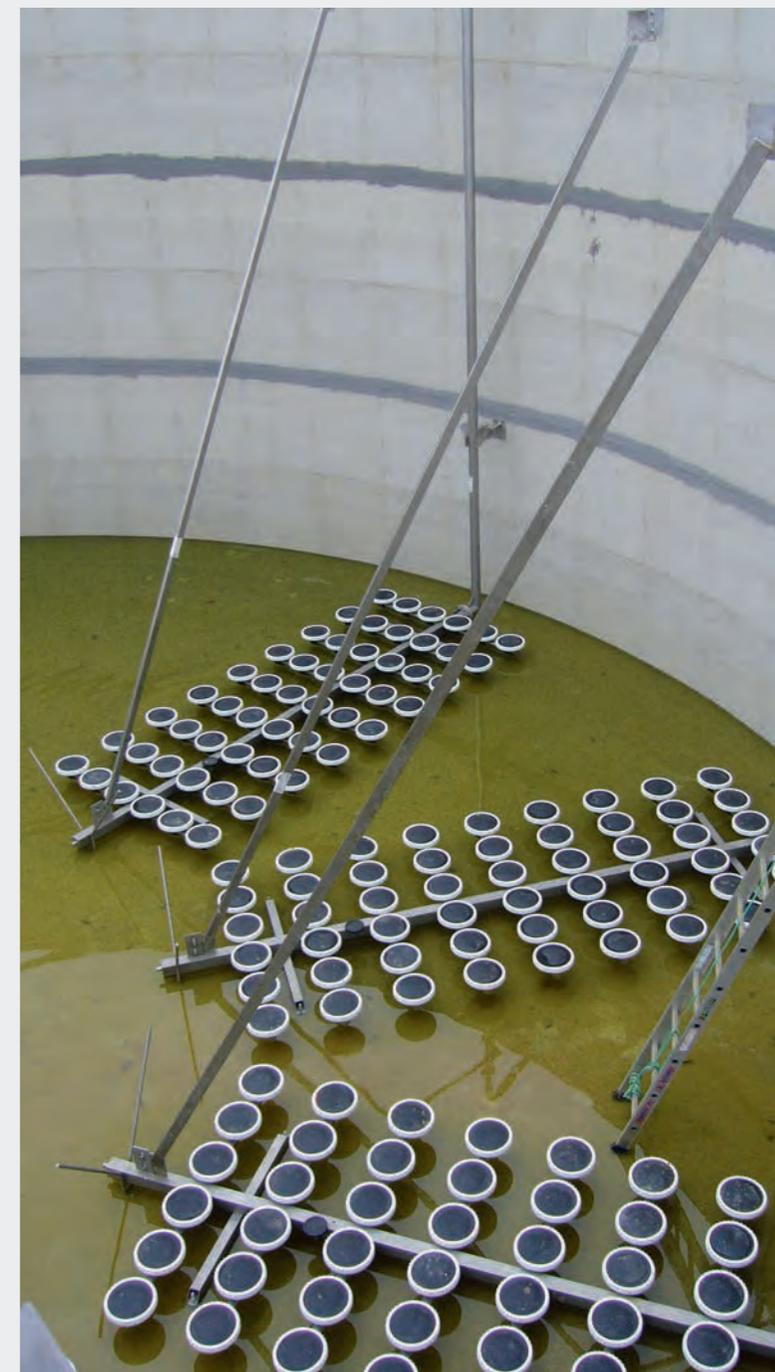


Рис. 109



[3]

**УСТАНОВКА,
ЭКСПЛУАТАЦИЯ
И ОПТИМИЗАЦИЯ**

УСТАНОВКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ

Монтажный комплект для мешалок и образователей потока

Поскольку мешалки и образователи потока являются погружными устройствами, для них требуется комплект монтажного оборудования, упрощающего опускание в резервуар, правильное размещение и ориентацию, а также последующий подъем из резервуара для текущего и экстренного технического обслуживания и ремонта.

СТОЙКА ИЗ ПРОФИЛЯ, ФИКСАТОРЫ, КРАН-БАЛКА

В состав монтажного комплекта входят три основных компонента (см. Рис. 1):

Кран-балка с лебедкой.

Стойка из профиля для перемещения оборудования по вертикали.

Верхний и нижний фиксатор. При необходимости, в комплект включается также **промежуточный кронштейн.**

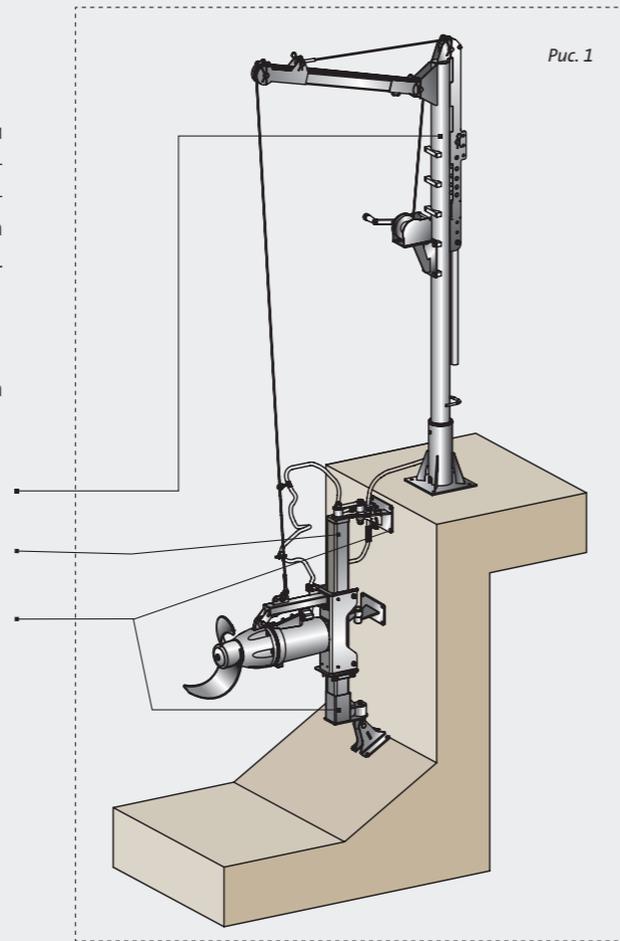
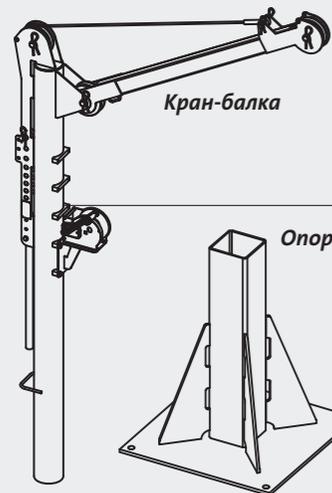
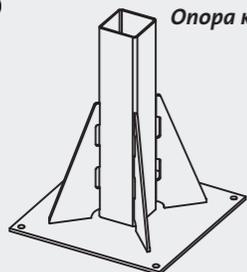


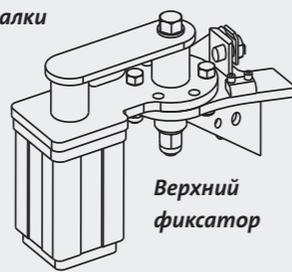
Рис. 1



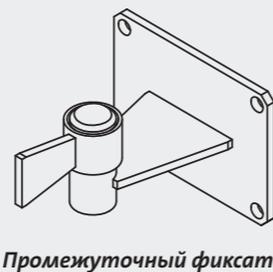
Кран-балка



Опора кран-балки



Верхний фиксатор



Промежуточный фиксатор



Нижний фиксатор

Угол **фиксаторов** можно регулировать по горизонтали с шагом 7,5°.

Кронштейн электродвигателя (см. Рис. 2 и 3) обеспечивает перемещение погружной мешалки вверх и вниз.

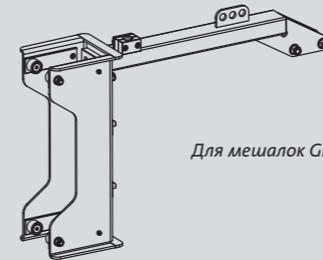


Рис. 2

Для мешалок Grundfos серии AMG

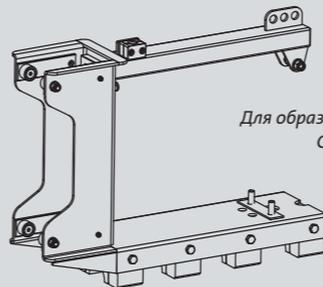


Рис. 3

Для образователей потока Grundfos серии AFG

Специальный кронштейн электродвигателя с регулировкой угла наклона (см. Рис. 4) используется в том случае, если требуется изменить угол наклона погружной мешалки по вертикали до 30° с шагом в 5°.

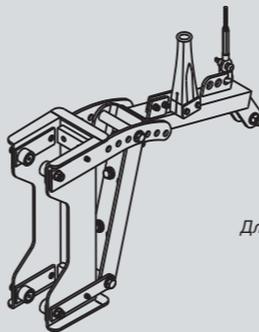


Рис. 4

Для образователей потока Grundfos серии AFG

МОНТАЖНЫЙ КОМПЛЕКТ ДЛЯ МЕШАЛОК

Монтажный комплект для погружных мешалок (серий AMD и AMG производства Grundfos) включает компоненты, указанные на Рис. 5.

Все компоненты выполнены из нержавеющей стали AISI 304 или AISI 316. Компоненты кран-балки имеются также в исполнении из оцинкованной стали.

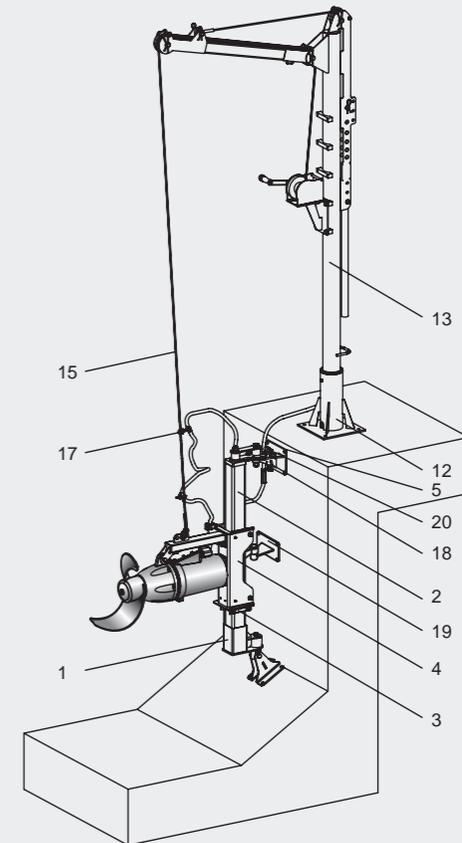


Рис. 5

Поз. Наименование

- 1 Нижний фиксатор/основание
- 2 Профильная стойка
- 3 Ограничитель глубины установки
- 4 Кронштейн электродвигателя
- 5 Верхний фиксатор
- 12 Опора кран-балки

Поз. Наименование

- 13 Кран-балка с лебедкой
- 15 Подъемный трос, соединительная скоба и зажим для проводов
- 17 Подъемный трос с зажимом
- 18 Фиксатор кабеля с соединительной скобой
- 19 Промежуточный кронштейн
- 20 Зажим для проводов

Даже для самой маленькой погружной мешалки Grundfos серии AMD 07 с прямым приводом предусмотрены различные монтажные комплекты. Мешалка может устанавливаться следующими способами (см. Рис. 6):

- a) подвесной монтаж
- b) настенный монтаж
- c) напольный монтаж (крепление к внутреннему дну резервуара)

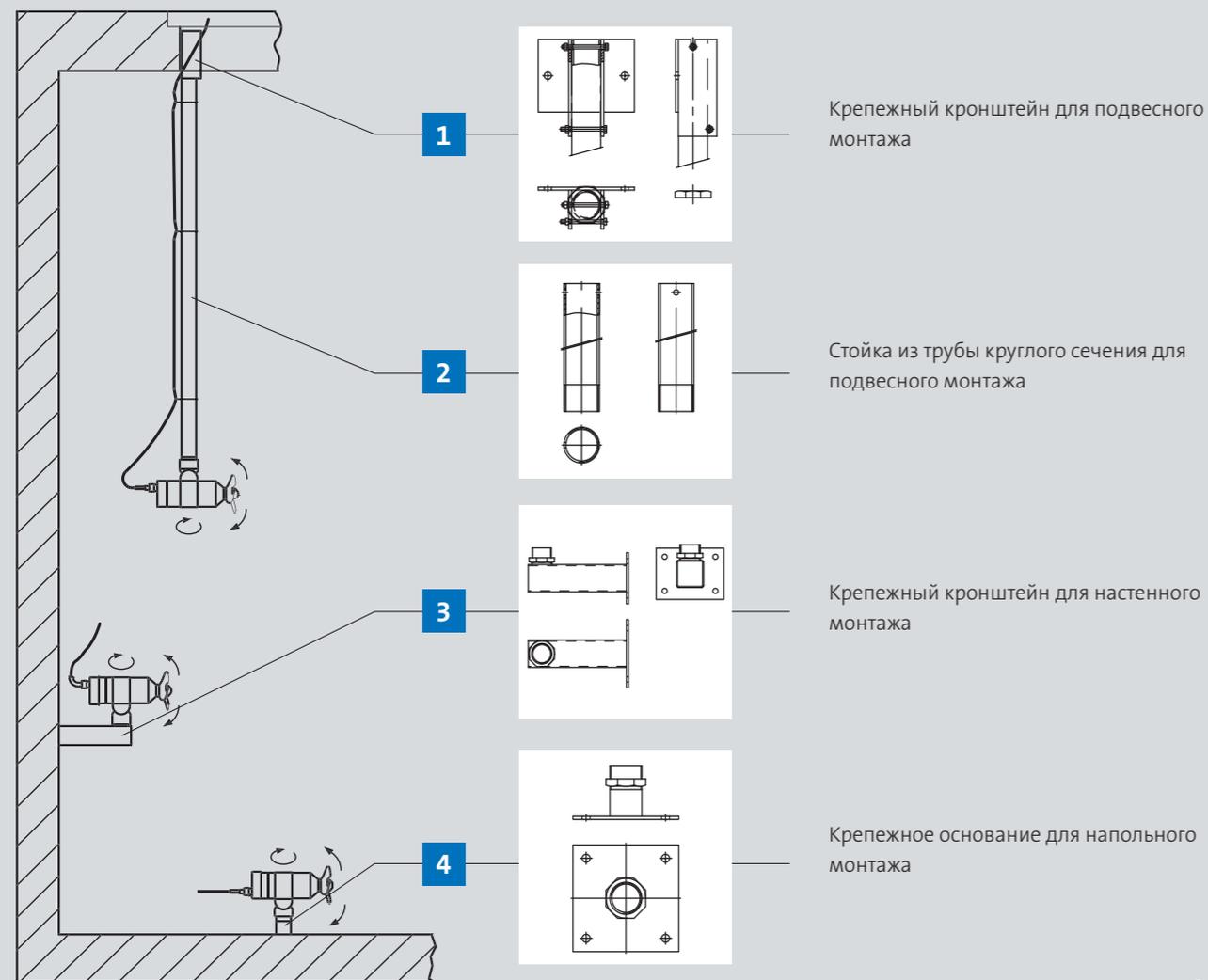


Рис. 6

МОНТАЖНЫЙ КОМПЛЕКТ ДЛЯ ОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОТОКА

Монтажный комплект для образвателей потока (серии AFG производства Grundfos) включает компоненты, указанные на Рис. 7.

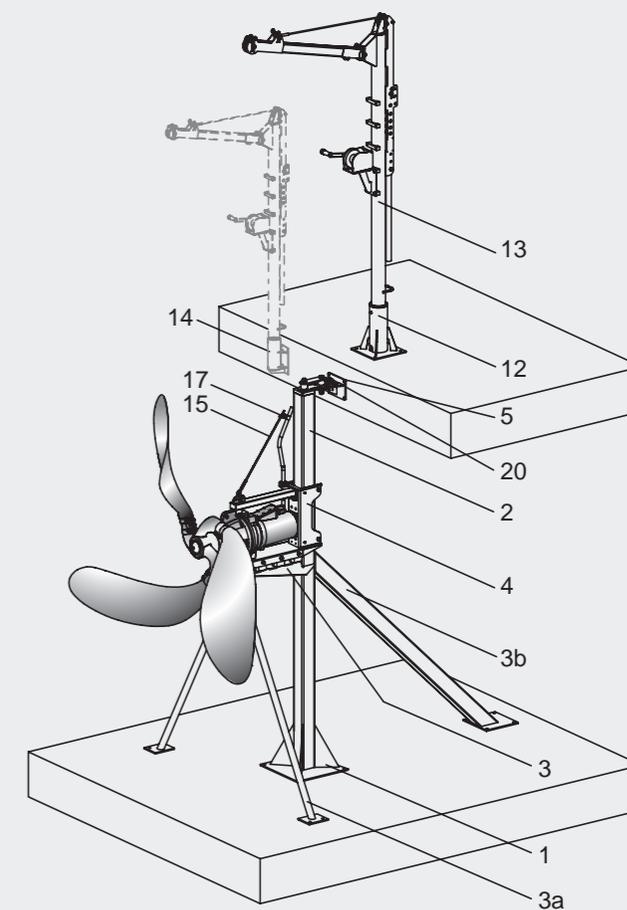
Все компоненты выполнены из нержавеющей стали AISI 304 или AISI 316. Компоненты кран-балки имеются также в исполнении из оцинкованной стали.

Поз. Наименование

1	Нижний фиксатор/основание
2	Стойка из профиля
3	Ограничитель глубины установки
3a	Передняя опора
3b	Задняя опора
4	Кронштейн электродвигателя
5	Верхний фиксатор, включая страховочный трос
12	Опора кран-балки
13	Кран-балка с лебедкой
14	Опора кран-балки для вертикального монтажа
15	Подъемный трос, включая соединительную скобу и зажим для проводов
17	Кабельный зажим
20	Зажим для проводов

В случае образвателей потока вместо одной направляющей стойки также используется нижняя опора штатива, которая крепится ко дну резервуара и обеспечивает равномерную передачу нагрузки на дно.

Рис. 7



Эксплуатация

Детальное описание монтажа, электрических подключений, пуска в эксплуатацию и обслуживания мешалок/образователей потока и соответствующего подъемного оборудования приводится в Руководстве по монтажу и эксплуатации для оборудования в исполнении 50 Гц и 60 Гц.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕШАЛОК/ОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОТОКА

Получив одну или несколько мешалок или образователей потока, перед тем как приступить к монтажу оборудования, следует выполнить следующие действия:

- проверить модель мешалки/образователя потока
- обеспечить соблюдение правил техники безопасности
- проверить целостность упаковки
- проверить комплектность поставки оборудования
- проверить условия хранения оборудования

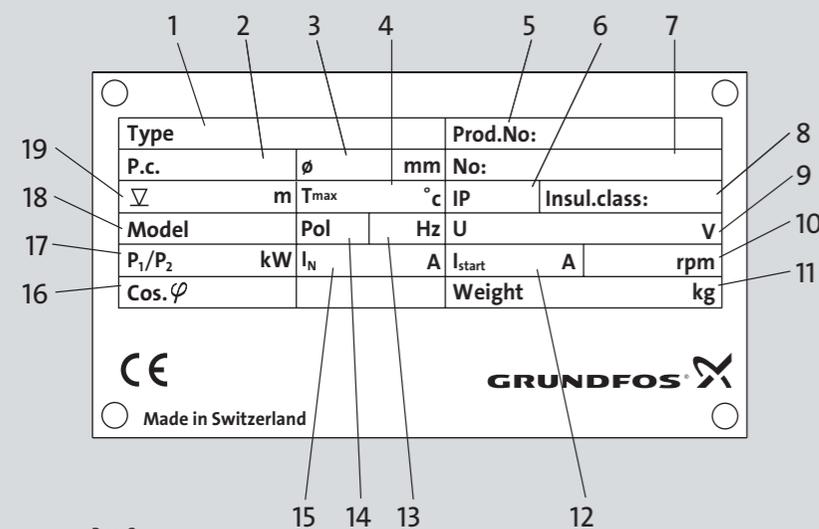


Рис. 8

Модель любой из мешалок или любого из образователей потока можно определить по фирменной табличке с техническими данными, расположенной на корпусе электродвигателя (см. Рис. 8). Указанная на ней информация необходима при заказе запасных узлов и деталей.

В комплект поставки оборудования входит дополнительная фирменная табличка, которую необходимо разместить на месте монтажа оборудования

Поз.	Наименование
1	Обозначение типа
2	Код изделия
3	Диаметр пропеллера
4	Температура перекачиваемой жидкости
5	Номер изделия
6	Степень защиты согласно IEC
7	Серийный номер изделия
8	Класс изоляции
9	Номинальное напряжение
10	Номинальная частота вращения (пропеллера)
11	Вес
12	Пусковой ток
13	Частота тока
14	Число полюсов
15	Номинальный ток
16	Кэффициент мощности
17	Мощность электродвигателя P ₁ /P ₂
18	Модель
19	Максимальная глубина установки

выбирать сухие помещения, температура которых не подвержена резким колебаниям. Если мешалка или образователь потока хранились на складе более года, необходимо заменить масло в редукторе, поскольку со временем свойства минеральных смазочных материалов ухудшаются.

ПОРЯДОК УСТАНОВКИ МЕШАЛОК/ОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОТОКА

Необходимо соблюдать установленный порядок монтажа оборудования. Рекомендации по монтажу приведены далее:

- Поднимать мешалку или образователь потока во время монтажа можно только за точки подвеса.
- Грузоподъемное оборудование, поставляемое вместе с оборудованием, а также цепь или трос, используемый для подъема и погружения мешалки или образователя потока в резервуар, должны применяться только для этих целей, а не как универсальная грузоподъемная оснастка.
- Ни в коем случае не подвешивать мешалку или образователь потока за кабель электропитания, входящий в комплект поставки.
- Мешалки и образователи потока ни в коем случае не должны работать, будучи подвешенными на грузоподъемном оборудовании.
- Необходимо обеспечить правильное расположение мешалок и образователей потока.

Правила расположения мешалок и образователей потока подробно изложены в разделе [2].

Необходимо правильно подключить все электрооборудование (защита электродвигателя, защита корпуса редуктора/уплотнения вала), соблюдать все правила запуска и т. д.

После того как все электрические подключения выполнены, необходимо удостовериться в том, что пропеллер мешалки или образователя потока вращается в правильном направлении (т. е. по часовой стрелке, если смотреть со стороны электродвигателя). Если пропеллер мешалки или образователя потока вращается в направлении, противоположном указанному, то есть против часовой стрелки, то мешалка или образователь потока не смогут обеспечить надлежащее осевое усилие и поток. Чтобы исправить ситуацию, необходимо поменять местами подключение любых двух фаз сети электропитания.

Необходимо выполнять приведенные далее указания по технике безопасности. Данные требования по технике безопасности должны выполняться при транспортировке, хранении, погрузочно-разгрузочных работах и при эксплуатации мешалок и образователей потока.

- Прежде чем приступить к любым работам с мешалкой или образователем потока, необходимо вынуть предохранители или отключить главный выключатель. Тем самым будут обеспечены условия, исключающие случайное включение электропитания.
- Монтаж, подключение, ввод в эксплуатацию и техническое обслуживание мешалки и образователя потока должны выполняться квалифицированным обслуживающим персоналом.
- Необходимо находиться на безопасном расстоянии от вращающихся узлов и деталей.
- Необходимо принять меры по оборудованию соответствующих ограждений, например, кожухов или перил (в целях предотвращения случайного падения в резервуар).

Предупредительные транспортировочные знаки указывают, что отдельные узлы и детали мешалки или образователя потока должны тщательно упаковываться для предохранения защитного поверхностного слоя от любых повреждений во время транспортировки. Мешалки/образователи потока должны быть надежно закреплены на транспортных средствах с целью предотвращения самопроизвольных перемещений. При подъеме компонентов изделия вручную необходимо соблюдать все действующие в данный момент местные требования по технике безопасности, касающиеся ограничений по весу. Если используется грузоподъемное оборудование, то оно должно быть предназначено специально для подъема и погружения мешалки или образователя потока в резервуар и предварительно проверено, чтобы исключить любое повреждение оборудования в процессе грузоподъемных работ.

Оборудование и принадлежности необходимо проверить в момент поставки на предмет отсутствия повреждений, полученных в процессе транспортировки на производственную площадку. В случае поставки поврежденных компонентов, демонтаж этих компонентов разрешается только при условии соответствующих указаний от компании Grundfos.

Необходимо выполнять все требования к хранению оборудования. Для хранения мешалок и образователей потока необходимо

ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ

Необходимо соблюдать установленный порядок ввода оборудования в эксплуатацию. В частности, следует выполнять следующие рекомендации:

- Перед вводом мешалки или образователя потока в эксплуатацию необходимо проверить уровень масла в корпусе редуктора/уплотнении вала
- Необходимо убедиться в том, что мешалка или образователь потока полностью погружены в перемешиваемую жидкость.
- Необходимо убедиться в том, что в резервуаре нет твердых плавающих предметов.

Техническое обслуживание

ОСНОВНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ

Как и в случае любого оборудования, надлежащее техническое обслуживание мешалок и образователей потока крайне необходимо для обеспечения высокоэффективной работы и продолжительного срока службы.

Необходимо соблюдать установленный порядок обслуживания оборудования. В частности, следует выполнять следующие рекомендации:

- Соблюдать графики обслуживания, в которых по каждому компоненту приводится детальное описание порядка обслуживания, смазки и осмотров.
- Соблюдать указания в части необходимого качества и количества масла для корпуса редуктора/уплотнения вала и электродвигателя соответственно.
- Соблюдать указания по замене масла.

Компания Grundfos предоставляет также видеоматериалы по обслуживанию оборудования. Прежде чем приступить к любым работам по обслуживанию мешалок или образователей потока, необходимо вынуть предохранители или отключить главный выключатель. Тем самым будут обеспечены условия, исключающие случайное включение электропитания.

Кроме того, прежде чем приступить к любым работам по обслуживанию мешалок или образователей потока, работающих в опасных для здоровья средах, необходимо полностью и надлежащим образом очистить или проветрить оборудование, резервуар и т.д. в соответствии с местными правилами.

ПРЕИМУЩЕСТВА РЕГУЛЯРНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Благодаря регулярному техническому обслуживанию, обеспечиваются существенные преимущества, в том числе:

- продолжительный срок службы мешалок и образователей потока
- экономия на закупках запасных частей
- обеспечение высоких эксплуатационных показателей мешалок и образователей потока в части расчетного соотношения осевое усилие-мощность, расхода, перемешивания по всему объему, надлежащего протекания всех предусмотренных процессов, поддержание чистоты дна и боковых стенок резервуара, высокая степень гомогенизации перемешиваемой жидкости и т.д.

ДИАГНОСТИКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ: ПРОБЛЕМЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Типичные проблемы при эксплуатации следующие:

- Мешалка или образователь потока не запускаются.
- Мешалка или образователь потока запускаются, но тут же останавливаются.
- Даже при работающем электродвигателе в резервуаре отсутствует циркуляция жидкости или характер циркуляции не отвечает требованиям.
- Неравномерная работа мешалки или образователя потока, повышенный шум.
- Высокий уровень тока и потребляемой мощности.

Карта обнаружения и устранения неисправностей приводится в руководстве по монтажу и эксплуатации для устройств в исполнении 50 Гц и 60 Гц соответственно. В ней приводится описание наиболее серьезных неисправностей, встречающихся при эксплуатации



РЕГУЛИРОВАНИЕ: ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ПРИВОД И ДРУГИЕ СПОСОБЫ

Кроме того, необходимо иметь в виду, что иногда причины определенных неисправностей не связаны с самим оборудованием, и для устранения этих неисправностей требуются определенные корректировочные действия.

В течение эксплуатации очистных сооружений такие характеристики, как объем резервуаров, тип и концентрация твердых частиц, могут меняться. В большинстве случаев объем резервуара изменить невозможно, но при этом необходимо изменить эксплуатационные характеристики уже используемых мешалок для того, чтобы обеспечить соответствие требованиям, обусловленным новыми характеристиками системы.

Вместо того чтобы устанавливать новое оборудование, можно дооснастить уже используемые мешалки или образователи потока частотно-регулируемыми приводами (далее ЧРП). За счет регулируемой частоты вращения пропеллеров можно, в соответствии с новыми требованиями, изменить объемную скорость потока, осевое усилие, потребляемую мощность и в конечном итоге производительность оборудования, определяемую соотношением осевое усилие-мощность.

В случае аэрируемых технологических резервуаров, режим потока в резервуаре во многом определяется используемой системой мелкопузырчатой аэрации, поскольку пузырьки воздуха создают существенное препятствие для горизонтального потока. Соответственно, при проектировании образователей потока необходимо обеспечить достаточную мощность, позволяющую преодолеть сопротивление воздушного барьера. Если впоследствии, в силу технологических потребностей, возникнет необходимость увеличить или уменьшить расчетную мощность системы аэрации, то для соответствия новым условиям эксплуатации настоятельно рекомендуется дооснастить образователи потока ЧРП.

Часто критерии проектирования образователей потока относятся к максимальному потоку воздуха, который подается в технологический резервуар для того, чтобы выполнить заданные технические требования. Однако в некоторых случаях может быть целесообразным принимать во внимание как максимальные, так и средние значения воздушного потока, поскольку максимальные значения наблюдаются только в результате пиковых гидравли-

ческих и органических нагрузок из-за суточных колебаний характеристик сточных вод.

Но, как правило, при расчетах нагрузки на очистные сооружения проектировщики учитывают запас по мощности. Это означает, что воздушный поток почти никогда не достигает максимума.



Возможно, применение ЧРП станет лучшим способом оптимизации образователей потока с точки зрения гидравлического КПД и энергопотребления.

Кроме того, множество технологических резервуаров рассчитаны на эксплуатацию и с системой аэрации, и без нее (то есть с поочередными процессами денитрификации/нитрификации). Во время циклов денитрификации система аэрации отключена. Это означает, что фактические гидравлические потери существенно ниже расчетных значений. Если образователи потока оснащены ЧРП, то с их помощью можно уменьшить осевое усилие в те периоды, когда система аэрации отключена или работает не с полной мощностью.

В ТЕЧЕНИЕ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ТАКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОСТУПАЮЩИХ СТОКОВ, КАК ОБЪЕМ, ТИП И КОНЦЕНТРАЦИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ, МОГУТ МЕНЯТЬСЯ

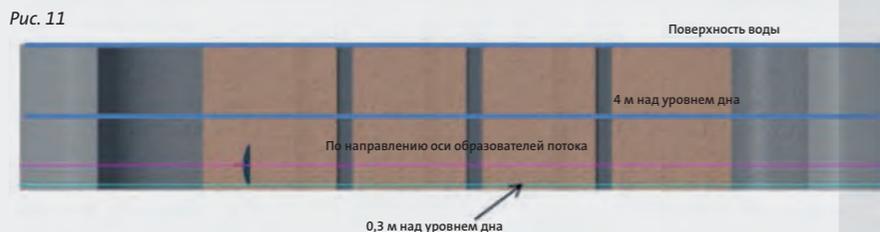
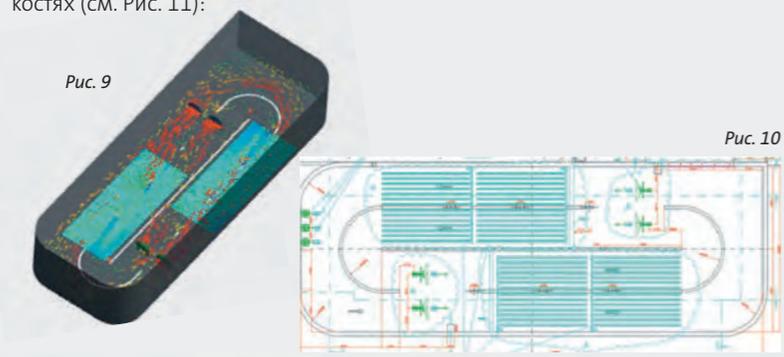
ПРИМЕР ИЗ ПРАКТИКИ: ТОЧНАЯ РЕГУЛИРОВКА ОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОТОКА AFG НА ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ LYON-LA FEYSSINE ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧРП

В качестве примера можно привести точную регулировку образвателей потока серии AFG производства Grundfos на очистных сооружениях Lyon-La Feyssine, где неоценимую помощь в принятии решения оказали результаты CFD моделирования.

Приток сточных вод 91 000 м³/день (эквивалент численности населения – 300 000) поступает на очистные сооружения, где на этапе биологической очистки задействованы два глубоких окислительных канала (уровень воды в резервуаре составляет 8,7 м) (см. Рис. 9 и 10). На стадии нитрификации задействовано 12 образвателей потока Grundfos модели AFG.75.260.41 и система аэрации Grundfos, включающая 5506 шт. 9-дюймовых дисковых диффузоров, а также донную систему воздухопроводов и принадлежностей. Для точной регулировки технологического процесса использовались 11 ЧРП Grundfos с частотным преобразователем CUE мощностью 11 кВт.

Для определения оптимального режима работы образвателей потока относительно условий эксплуатации системы аэрации было выполнено CFD моделирование.

CFD моделирование выполнялось в четырех разных горизонтальных плоскостях (см. Рис. 11):

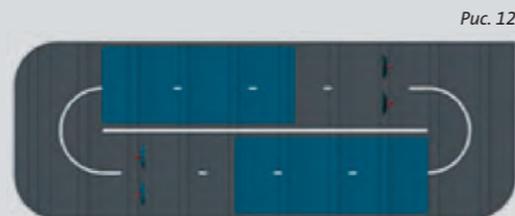


При анализе потока в одном из окислительных каналов, оснащенных четырьмя образвателями потока AFG 75.260.41, рассматривались три сценария для четырех различных эксплуатационных ситуаций (обозначенных как А, В, С, D, Е, F, G и Н) (см. Рис. 12 и 13).

Сценарий 1: система аэрации включена

Четыре ситуации:

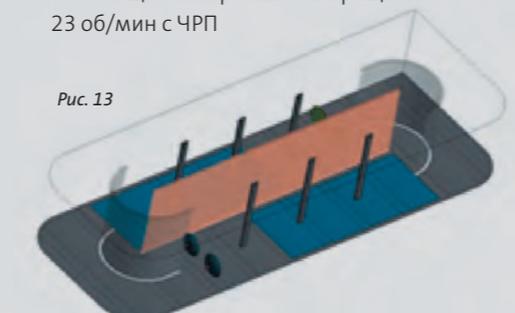
- A. 4 500 м³/ч С. 2 500 м³/ч
- B. 3 500 м³/ч D. 1 000 м³/ч



Сценарий 2: система аэрации отключена

Две ситуации, при которых образватели потока работают следующими образом:

- E. 80% мощности при частоте вращения 33 об/мин с ЧРП
- F. 60% мощности при частоте вращения 23 об/мин с ЧРП



Сценарий 3: система аэрации включена

Две ситуации, когда образватели потока работают с мощностью 80% при частоте вращения 33 об/мин с ЧРП:

- G. 2 500 м³/ч
- H. 1 000 м³/ч

Для каждой ситуации при каждом сценарии CFD моделирование выполнялось в указанных выше горизонтальных проекциях. По каждому сценарию в результате CFD моделирования были визуализированы линии потока воды (см. пример на Рис. 14), профили скорости воды (см. пример на Рис. 15), векторы скорости воды (см. примеры на Рис. 16) и напряжения сдвига у дна (см. пример на Рис. 17).

Результаты расчета средней скорости в условиях А, В, С, D, G и H (с включенной системой аэрации, см. Таблицу 1) показали два различных режима потока:

- Спиральный поток, образованный системой аэрации
- Проток, образованный в результате взаимодействия образвателей потока и воздушного барьера

Кроме того, спиральные потоки должны воспрепятствовать развитию объемного потока.

Расположение в резервуаре сточной воды	0,3 м над уровнем дна	По оси образвателя потока AFG	4 м над уровнем дна	На поверхности воды
Средняя скорость (м/с)				
A	0,737	0,651	0,522	0,729
B	0,595	0,583	0,446	0,584
C	0,590	0,607	0,474	0,408
D	0,583	0,624	0,472	0,504
G	0,565	0,449	0,343	0,548
H	0,458	0,529	0,398	0,292

Таблица 1

Результаты расчета средней скорости в условиях E и F с выключенной системой аэрации показаны в Таблице 2.

Расположение в резервуаре сточной воды	0,3 м над уровнем дна	По оси образвателя потока AFG	4 м над уровнем дна	На поверхности воды
Средняя скорость (м/с)				
E 33 об/мин	0,518	0,532	0,435	0,465
E 33 об/мин	0,338	0,375	0,318	0,338

Таблица 2

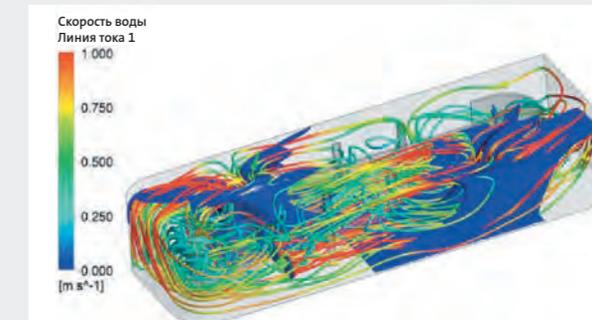


Рис. 14 Линии тока

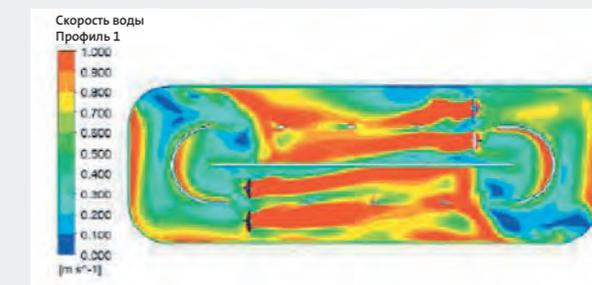


Рис. 15 Профили скорости

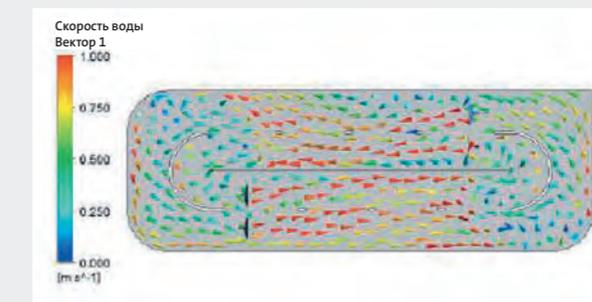


Рис. 16 Векторы скорости

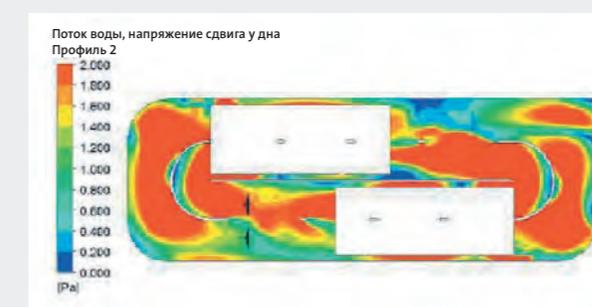


Рис. 17 Напряжение сдвига у дна

На Рис. 18 показаны результаты CFD-моделирования напряжений сдвига у дна для ситуаций Е и F.

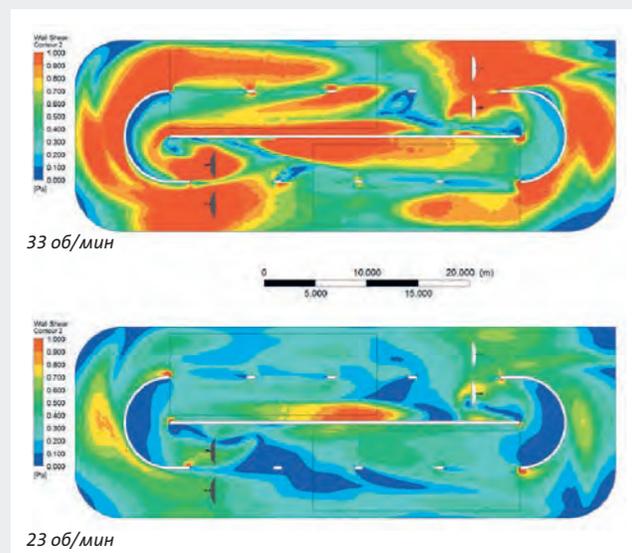


Рис. 18

Уменьшение частоты вращения образателя потока до 23 об/мин не обеспечивает достаточное осевое усилие, которое позволило бы избежать оседания твердых частиц в резервуаре, в то время как частота вращения 33 об/мин оказывается удовлетворительным решением. На основании этих результатов было принято решение эксплуатировать образатели потока при частоте вращения 30 об/мин во всех случаях, когда система аэрации отключена.

Поскольку противоток (см. Рис. 19) может снизить эффективность системы аэрации, такие ситуации следовало свести к минимуму. Другими словами, в случае низкой интенсивности воздушного потока частоту вращения образателей потока желательно уменьшить.

Для дальнейшего анализа были выбраны следующие сценарии:

- Аэрация при 45%
- Аэрация при 25%

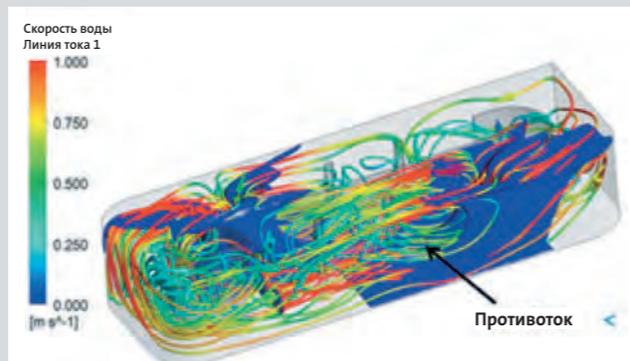


Рис. 19

В обоих случаях образатели потока работали с частотой вращения 33 об/мин (при мощности 80%).

В условиях низкой интенсивности воздушного потока (см. Рис. 20) скорость потока у дна составляет более 0,5 м/с, а при более интенсивном воздушном потоке скорость примерно равна 0,4 м/с (см. Рис. 21). Было принято решение эксплуатировать образатели потока с частотой вращения 30 об/мин во всех случаях, когда мощность воздушного потока менее 50%.

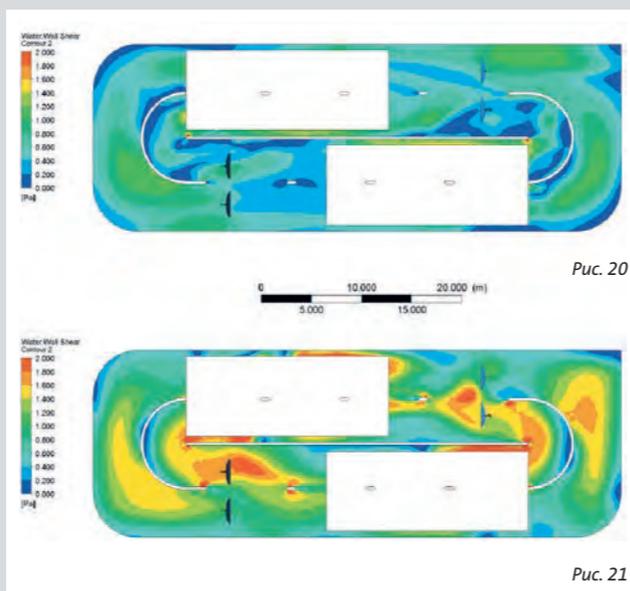


Рис. 21

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ

Концентрация твердых частиц и скорость потока являются важными параметрами процессов перемешивания и формирования горизонтального потока. В данном разделе описаны методы измерения и используемое оборудование. Кроме того, приводится информация об испытательных стендах Grundfos и их использовании.

Измерение концентрации твердых частиц

Если согласно требованиям заказчика или условиям тендера необходимо измерение концентрации твердых частиц, то до размещения заказа заказчик и поставщик должны согласовать метод измерения, участки измерения и измерительные приборы.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

Определение метода измерения концентрации твердых частиц в технологическом резервуаре требует, во-первых, определения пограничных условий и достаточного количества участков измерения. Как правило, пограничные условия определяются на основании геометрических характеристик и эксплуатационных данных.

Что касается выбора участков измерения, то необходимо учесть следующие моменты:

- Равноудаленные друг от друга, существующие переходные мостики могут рассматриваться как потенциальные участки измерения необходимых параметров. Необходимо выдерживать внутреннее минимальное расстояние 0,5 м от стенки резервуара и от перемешивающего оборудования.
- Дополнительные участки измерения должны располагаться вдоль стенки и в углу резервуара. В этом случае необходимое минимальное расстояние также составляет 0,5 м.
- Как правило, достаточно 4 или 5 участков измерения в каждом резервуаре.

После того как в каждом участке выбраны точки измерения, можно приступать к замеру концентрации твердых частиц. Точки измерения должны быть равномерно распределены по всей толщине слоя воды: нижние и верхние точки измерения должны находиться

на расстоянии 0,3 м от дна резервуара и от поверхности воды соответственно, а остальные точки измерения должны равномерно располагаться на расстоянии примерно 1 м друг от друга.

В каждой точке измерения берутся пробы, и выполняется анализ содержимого каждой пробы. Концентрация твердых частиц $TS\%$ измеряется в соответствии со стандартом DIN EN 12880.

Для каждой точки измерения рассчитывается среднее значение $TS\%$ для всего количества проб i , взятых в этой точке. По всем средним значениям TS_i выводится одно среднее значение TS_n , включающее все точки измерения n ; кроме того, определяется минимальное значение TS_{min} и максимальное значение TS_{max} . Активный ил в резервуаре считается равномерно перемешанным, если отклонение от среднего значения измерения для 90% значений не превышает 12%.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ

Для правильного отбора проб необходим надлежащий прибор для отбора проб (пробоотборник). После отбора пробы пробоотборник закрывается, оставаясь погруженным в воду. Объем пробы может составлять от 500 до 1000 мл. После того как пробы взяты, их необходимо встряхнуть и перенести в емкость с крышкой, на которую наносится соответствующая маркировка. Перед тем как взять следующую пробу, погружной пробоотборник необходимо промыть чистой водой.

Измерение скорости

Во всех резервуарах со сформированным горизонтальным потоком измерения скорости позволяют получить детальную информацию о параметрах потока при условии, что измерения выполнены правильно, то есть использовалась надлежащая измерительная аппаратура, а замеры выполнялись в репрезентативных поперечных сечениях.

Подробную информацию можно найти в Технических условиях Союза немецких машиностроителей (VDMA) № 24656.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ

Для измерений может использоваться различное оборудование, например:

- Флюгерный датчик (типа анемометра)
- Магнитно-индуктивный датчик для измерения скорости потока (типа Flo-Mate)
- Акустический доплеровский измеритель потока

Флюгерный датчик (см. Рис. 22) измеряет составляющие вектора скорости только в одном пространственном направлении, поэтому использовать его нежелательно, так как поток в резервуарах турбулентный и трехмерный.

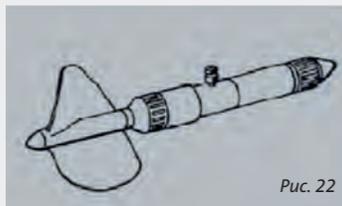


Рис. 22

Магнитно-индуктивный датчик (см. Рис. 23) позволяет измерить два горизонтальных компонента вектора скорости. Одновременно измерить третий компонент невозможно.



Рис. 23

Одновременное измерение компонентов вектора скорости по всем трем направлениям в одной и той же точке выполняется при помощи датчика, показанного на Рис. 24. Используя датчик данного типа, можно также измерить характеристические параметры неравномерных потоков.



Рис. 24

ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для репрезентативности измерений их следует выполнять в поперечных сечениях резервуара. Местоположение поперечных сечений зависит от формы резервуара, а также от типа и местоположения системы аэрации (если она установлена).

Измерения выполняются в не аэрируемой зоне резервуара. В зависимости от того, с какой целью выполняются измерения, а также в зависимости от формы резервуара для измерений необходимо выбрать как минимум одно поперечное сечение.

Результаты измерений выражаются в м/с или в см/с. Скорость потока по вертикальному поперечному сечению не является постоянной характеристикой. Соответственно, чтобы рассчитать среднюю скорость или построить график профиля скорости в поперечном сечении, необходимо выполнить несколько замеров в разных точках сечения.

На поперечное сечение, в котором выполняется измерение, накладывается измерительная сетка (см. Рис. 25):

- Участки измерения, горизонтально распределенные по поперечному сечению
- Точки измерения, вертикально распределенные по каждому участку измерения

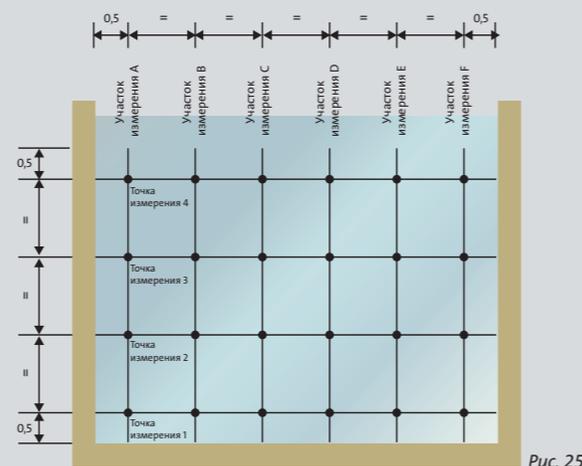


Рис. 25

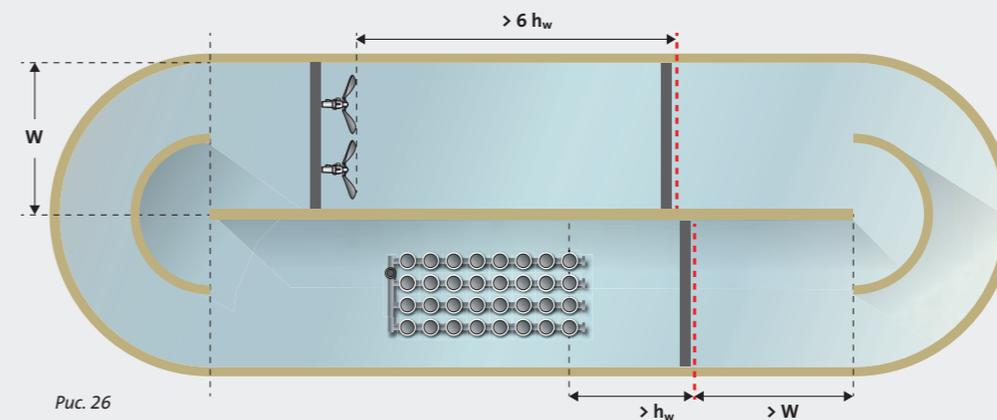


Рис. 26

--- Измерительная сетка
 h_w = Уровень воды в резервуаре

На Рис. 26 и 27 показано расположение измерительных сеток в окислительном канале и в резервуаре в форме кольцевого канала соответственно.

Для сбора данных по характеристикам потока в резервуаре при реальных условиях эксплуатации измерения необходимо выполнять для всех соответствующих рабочих режимов, например, при работающей и отключенной системе аэрации.

РАСПОЛОЖЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СЕТКИ В ЗАМКНУТЫХ РЕЗЕРВУАРАХ

Результаты измерений, выполняющихся слишком близко к стенкам резервуара, колоннам, закругленным отражательным перегородкам и т. д., могут быть неточными. Из-за воздействия препятствий, измеренные значения скорости потока могут быть меньше, чем ожидалось. Измерения не следует выполнять слишком близко к перемешивающему оборудованию или зонам аэрации, поскольку они являются источниками турбулентности. Кроме того, результаты измерений будут искажены из-за пузырьков воздуха.

С чисто практической точки зрения, для экономии средств и времени такие измерения часто выполняются в удобных для этого местах, например, на имеющихся переходных мостиках.

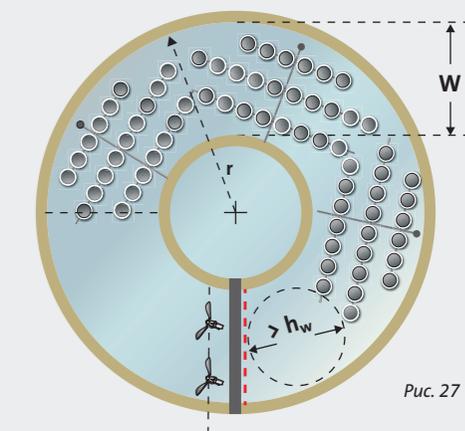


Рис. 27



РАСЧЕТ СРЕДНЕЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СКОРОСТИ

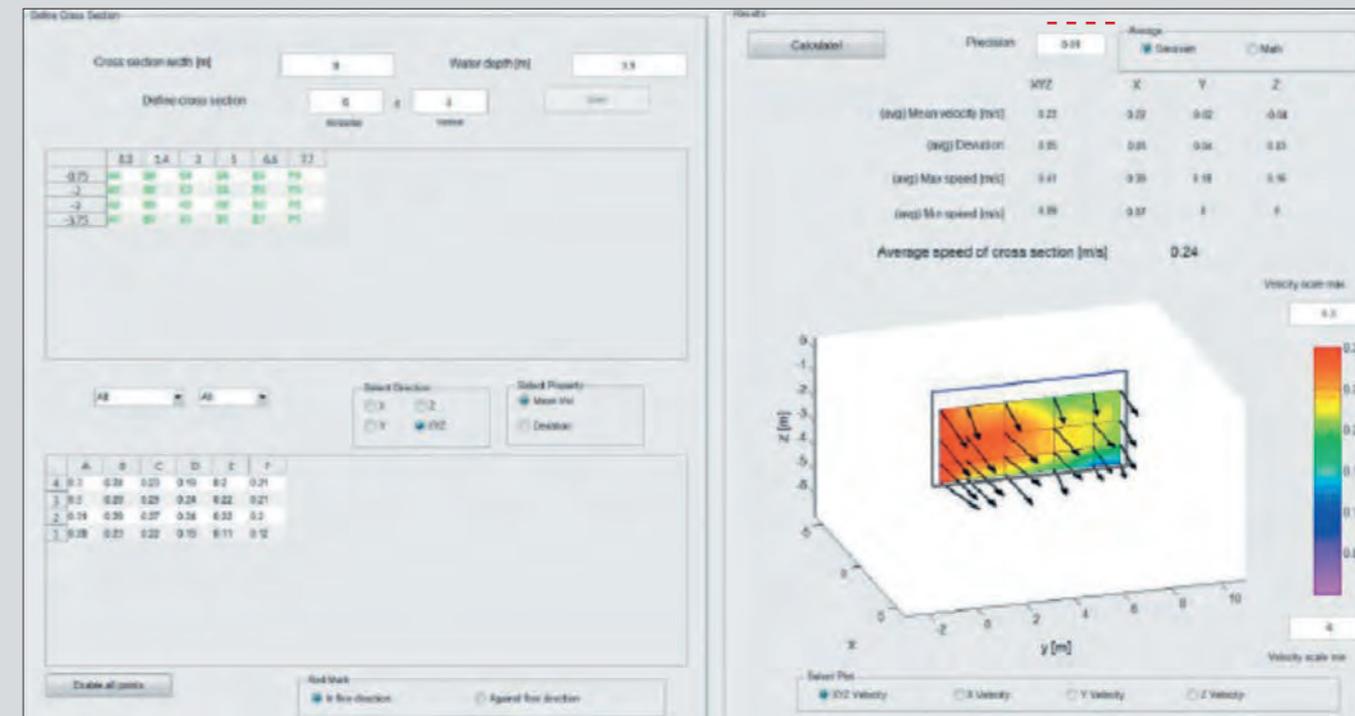
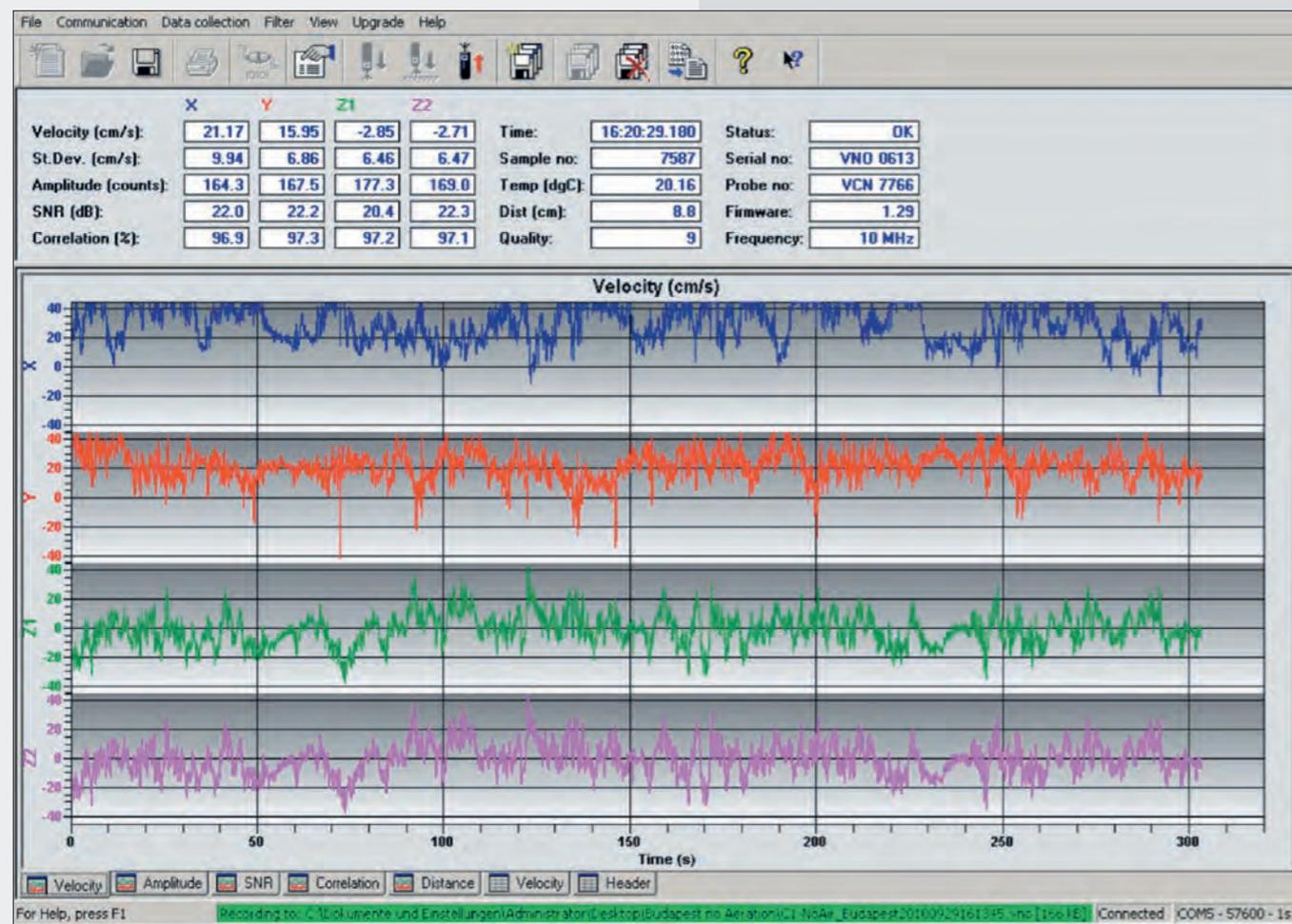
Время измерения в каждой точке x является фиксированным и определяется как $t_x = 200$ с.

Датчик подключается к ноутбуку (см. Рис. 28) с установленным специальным программным обеспечением для регистрации результатов измерений (см. Рис. 29). Впоследствии результаты измерений можно обработать при помощи собственного программного обеспечения или импортировать в динамические электронные таблицы для интерпретации результатов.

Рис. 28



Рис. 29

**Испытание оборудования на испытательных стендах Grundfos**

Компания Grundfos выполняет испытания своего перемешивающего оборудования на специально построенном испытательном стенде, который позволяет тестировать рабочие характеристики оборудования в соответствии с международным стандартом ISO 21630. Согласно программе испытаний выполняется сбор экспериментальных данных, которые впоследствии используются для актуализации технических спецификаций на различные существующие модели перемешивающего оборудования, для разработки новых продуктов, а также для проверки результатов моделирования CFD.

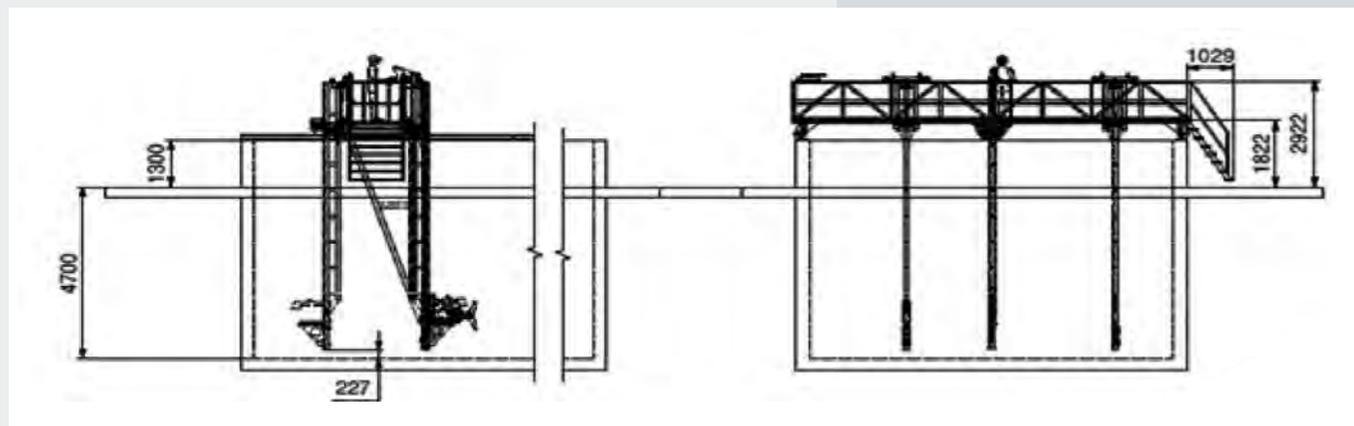
Испытательный стенд Grundfos для тестирования процессов перемешивания, известная как «Mixer Tester» (см. Рис. 30, 31 и 32) представляет собой железобетонную конструкцию со следующими внутренними размерами: длина 20 м, ширина 8 м и глубина 6,3 м.



Рис. 30



Рис. 31



Максимальный уровень воды в резервуаре может составлять 6 м, а общий объем резервуара – 960 м³.

Внутри резервуара установлены колонны из нержавеющей стали. Кроме того, для создания требуемой конфигурации резервуара (в том числе и с замкнутым контуром) устанавливаются съемные перегородки из армированного стеклопластика или пористый экран. Этот резервуар используется для эксплуатационных испытаний оборудования, моделирования конструктивных решений для различных применений и проверки результатов CFD моделирования.

Как правило, только одна мешалка с высокой частотой вращения или мешалка (образователь потока) с низкой частотой вращения производства Grundfos проходит испытание на время измерения производительности внутри испытательного стенда Mixer Tester. Однако в стенде Mixer Tester одновременно могут испытываться несколько перемешивающих устройств (максимум 4).

Специальная конструкция в виде моста (см. Рис. 33) со съемной тестовой платформой посередине, на которой перпендикулярно к мосту устанавливается испытываемый образец, позволяет выполнять измерения всех параметров (осевое усилие, мощность, крутящий момент, поток и т. д.) погружного перемешивающего оборудования Grundfos с диаметром пропеллера до 2,8 м.

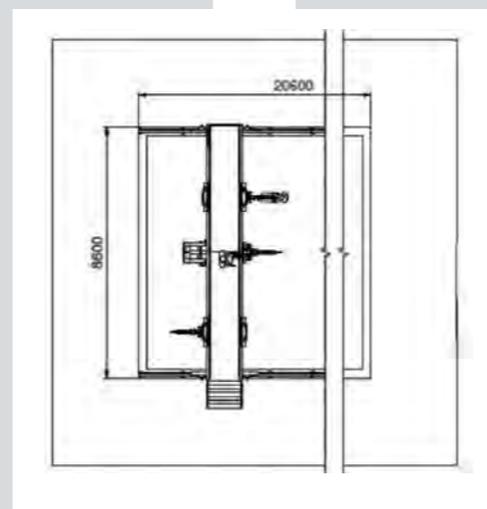


Рис. 33

Рис. 32

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ

Введение

Оптимизация перемешивающей системы зависит от конфигурации резервуара, расположения оборудования, как обсуждалось ранее, в вертикальной плоскости, а также от дооснащения иным оборудованием, например, ЧРП.

Оптимизация обеспечивает достижение следующих целей:

- Значительное снижение энергопотребления
- Минимизация возможных неисправностей за счет повышения ресурса оборудования
- Наилучшие эксплуатационные качества, оптимально соответствующие технологическим процессам

Результат оптимизации конфигурации резервуара

СРАВНЕНИЕ КВАДРАТНОГО ИЛИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ РЕЗЕРВУАРОМ

На большинстве очистных сооружений водоотведения резервуары квадратной или прямоугольной формы располагаются последовательно. Такая планировка облегчает прохождение потока из одного резервуара в другой за счет расположенных ниже уровня воды отверстий или переливного устройства в общей стенке резервуаров.

Такая же конфигурация очистных сооружений с цилиндрическими резервуарами не облегчает прохождение потока из одного резервуара в другой, и в большинстве случаев общая стоимость строительства данных сооружений оказывается выше. Кроме того, очистные сооружения в этом случае занимают большую площадь, так как цилиндрические резервуары невозможно расположить очень близко друг к другу.

Цилиндрические резервуары в основном используются на определенных технологических этапах, таких как усреднение стоков по качественному составу, хранение осадка, анаэробное разло-

жение и уплотнение осадков, либо там, где требуется ограниченное количество резервуаров, например, 1–2 резервуара.

Если мы сравним два резервуара – квадратный и цилиндрический – одинакового объема и с одинаковым уровнем воды в резервуаре, наполненных сточной водой с одинаковой концентрацией твердых частиц ($TS \leq 0,5\%$), то осевое усилие, которое должно обеспечиваться высокоскоростными мешалками (серии AMG производства Grundfos) для поддержания твердых частиц во взвешенном состоянии и их равномерного распределения по всему объему, будет выше в случае квадратного или прямоугольного резервуара, чем в случае цилиндрического резервуара (см. примеры на Рис. 34, 35, 36, 37, 38 и 39). Основной причиной являются гидравлические потери в углах резервуара.

С другой стороны, только правильное расположение перемешивающих устройств в цилиндрическом резервуаре позволит избежать потенциального формирования опасных завихрений потока в центральной части резервуара, с последующим риском осаждения твердых частиц на дно резервуара в центре.

В случае квадратных или прямоугольных резервуаров правильное расположение мешалок относительно входа и выхода жидкости, а также с учетом иных воздействующих факторов (препятствия, наличие прямков насоса, системы аэрации и т. д.) существенно влияет на минимизацию потребления энергии, необходимой для создания эффективного объемного потока.



Геометрическая форма резервуара	Размеры [м]	Уровень воды относительно дна резервуара [м]	Объем [м³]
Квадратный резервуар	14,2 x 14,2	4,0	800
	16,3 x 16,3	4,5	1 200
	17,9 x 17,9	5,0	1 600
	18,3 x 18,3	6,0	2 000
Цилиндрический резервуар	∅ 16,0	4,0	800
	∅ 18,4	4,5	1 200
	∅ 20,2	5,0	1 600
	∅ 20,6	6,0	2 000

Рис. 34

Геометрическая форма резервуара	Размеры [м]	Уровень воды относительно дна резервуара [м]	Объем [м³]
Прямоугольный резервуар	10,0 x 25,0	4,0	1 000
	12,0 x 26,0	4,5	1 400
	15,0 x 24,0	5,0	1 800
	16,3 x 22,5	6,0	2 200
Цилиндрический резервуар	∅ 17,9	4,0	1 000
	∅ 20,0	4,5	1 400
	∅ 21,4	5,0	1 800
	∅ 21,6	6,0	2 200

Рис. 37

Осевое усилие в квадратных и цилиндрических резервуарах

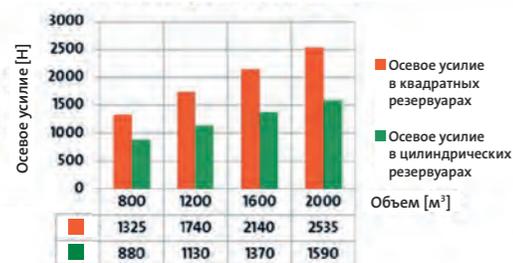


Рис. 35

Осевое усилие в прямоугольных и цилиндрических резервуарах

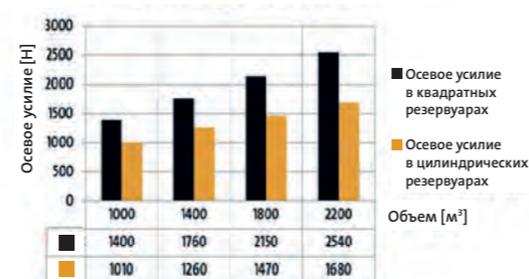


Рис. 38

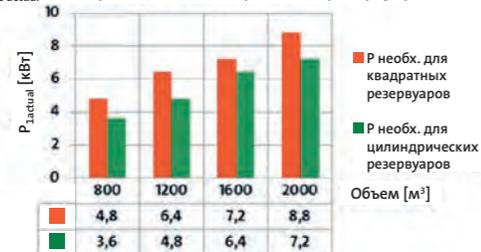
P_{1actual} в квадратных и цилиндрических резервуарах

Рис. 36

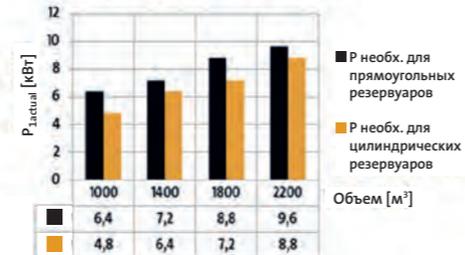
P_{1actual} в прямоугольных и цилиндрических резервуарах

Рис. 39

ЗАМКНУТЫЕ РЕЗЕРВУАРЫ – ВЛИЯНИЕ РАЗНЫХ ТИПОВ КОНФИГУРАЦИИ

Выбор и применение мешалок с низкой частотой вращения (образователей потока Grundfos серии AFG) в замкнутых резервуарах во многом определяется конкретной конфигурацией резервуара. Для обеспечения горизонтального потока и одновременного удержания твердых частиц во взвешенном состоянии в прямоугольном замкнутом резервуаре требуется иное осевое усилие по сравнению с замкнутым изогнутым резервуаром (классическим окислительным каналом) из-за различной конструкции отражательных стенок резервуаров.

Следующий пример показывает вариативность необходимых значений осевого усилия в замкнутых резервуарах различной конфигурации, содержащих сточные воды с одинаковой концентрацией твердых частиц ($TS \leq 0,5\%$), с одинаковым объемом и одинаковым уровнем воды относительно дна резервуара. Необходимая средняя скорость потока в канале составляет 0,3 м/с.

Из примера, в котором сравниваются прямоугольные резервуары, резервуары со скошенными углами и резервуары с закругленными углами (см. Рис. 40, 41 и 42), ясно видно, что, хотя распределенные по объему гидравлические потери существенно не отличаются, но различные конфигурации с изогнутыми отражательными стенками существенно влияют на локальные гидравлические потери. Следовательно, это оказывает влияние на требуемые значения изменения осевого усилия для каждой конфигурации (см. Таблицы 1, 3, 5 и 7), а также на выбор образователей потока с точки зрения количества, диаметра пропеллера и мощности электродвигателя (см. Таблицы 2, 4, 6 и 8).

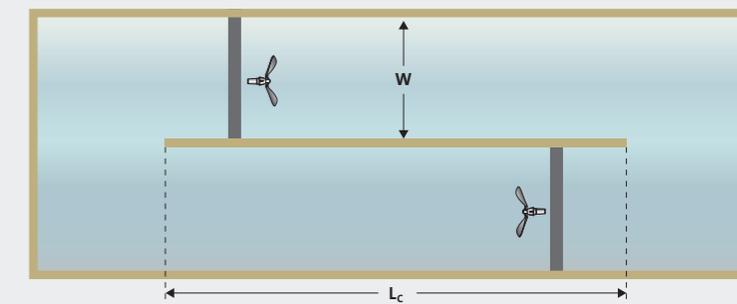


Рис. 40

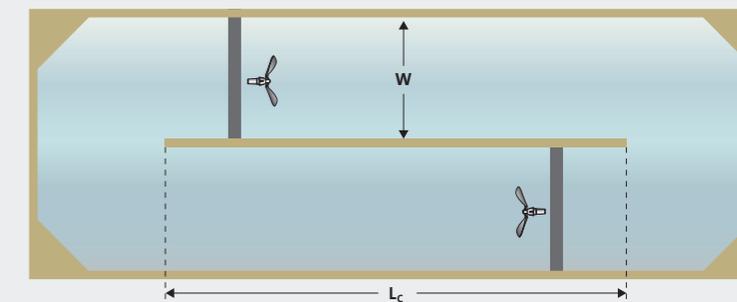


Рис. 41

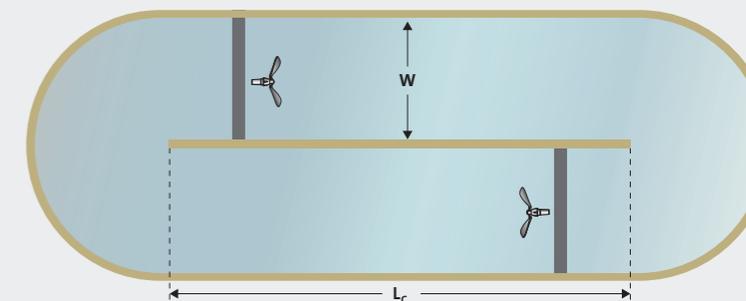
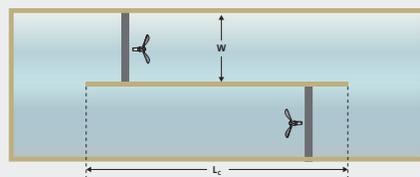


Рис. 42

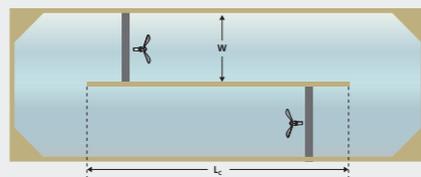
ВЫБОР И ПРИМЕНЕНИЕ МЕШАЛОК С НИЗКОЙ ЧАСТОТой ВРАЩЕНИЯ В ЗАМКНУТЫХ РЕЗЕРВУАРАХ СУЩЕСТВЕННО ЗАВИСИТ ОТ ВЫБРАННОЙ КОНФИГУРАЦИИ РЕЗЕРВУАРА.

Закругленные отражательные перегородки отсутствуют.

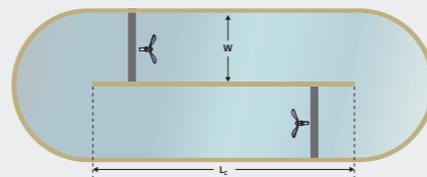
КОНФИГУРАЦИЯ 1



КОНФИГУРАЦИЯ 2



КОНФИГУРАЦИЯ 3



Размеры	L_c [м]	W [м]	WD [м]	Объем [м ³]	Потребное осевое усилие [N]
Конфигурация	1	46,7	7,5	5 000	11107
	2	48,6	7,5	5 000	9091
	3	50,0	7,5	5 000	6852

Таблица 1

Размеры	Модели образателей потока GF	$P_{1\text{ actual}}$ [кВт]	Кол-во	Общая мощность P_1 , фактическая [кВт]	
Конфигурация	1	AFG 40.260	4,7	3	14,1
	2	AFG 34.260	3,8	3	11,4
	3	AFG 40.260	4,7	2	9,4

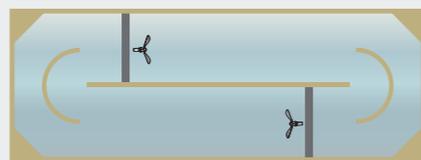
Таблица 2

Симметрично расположенные закругленные отражательные перегородки

КОНФИГУРАЦИЯ 1



КОНФИГУРАЦИЯ 2



КОНФИГУРАЦИЯ 3



Размеры	L_c [м]	W [м]	WD [м]	Объем [м ³]	Потребное осевое усилие [N]
Конфигурация	1	46,7	7,5	5 000	5226
	2	48,6	7,5	5 000	4237
	3	50,0	7,5	5 000	3678

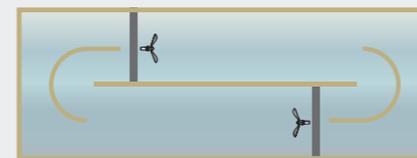
Таблица 3

Размеры	Модели образателей потока GF	$P_{1\text{ actual}}$ [кВт]	Кол-во	Общая мощность P_1 , фактическая [кВт]	
Конфигурация	1	AFG 40.260	4,7	2	9,4
	2	AFG 30.260	3,4	2	6,8
	3	AFG 40.260	4,7	1	4,7

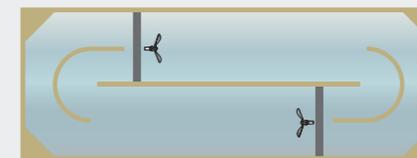
Таблица 4

Симметрично расположенные удлиненные отражательные перегородки

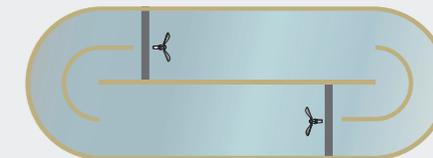
КОНФИГУРАЦИЯ 1



КОНФИГУРАЦИЯ 2



КОНФИГУРАЦИЯ 3



Размеры	L_c [м]	W [м]	WD [м]	Объем [м ³]	Потребное осевое усилие [N]
Конфигурация	1	46,7	7,5	5 000	4442
	2	48,6	7,5	5 000	3864
	3	50,0	7,5	5 000	3286

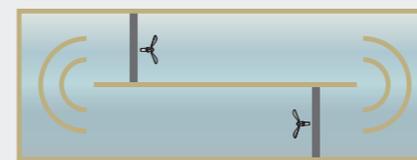
Таблица 5

Размеры	Модели образателей потока GF	$P_{1\text{ actual}}$ [кВт]	Кол-во	Общая мощность P_1 , фактическая [кВт]	
Конфигурация	1	AFG 30.260	3,4	2	6,8
	2	AFG 40.260	4,7	2	4,7
	3	AFG 34.260	3,8	1	3,8

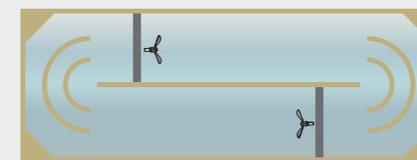
Таблица 6

Двойные симметрично расположенные закругленные отражательные перегородки

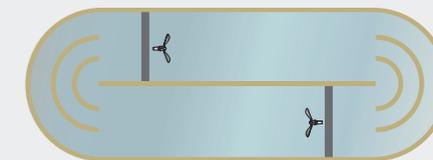
КОНФИГУРАЦИЯ 1



КОНФИГУРАЦИЯ 2



КОНФИГУРАЦИЯ 3



Размеры	L_c [м]	W [м]	WD [м]	Объем [м ³]	Потребное осевое усилие [N]
Конфигурация	1	46,7	7,5	5 000	4050
	2	48,6	7,5	5 000	3303
	3	50,0	7,5	5 000	2744

Таблица 7

Размеры	Модели образателей потока GF	$P_{1\text{ actual}}$ [кВт]	Кол-во	Общая мощность P_1 , фактическая [кВт]	
Конфигурация	1	AFG 18.180	2,2	3	6,6
	2	AFG 24.180	3,0	2	6,0
	3	AFG 30.260	3,4	1	3,4

Таблица 8

В целом, при любой конструкции резервуара установка закругленных отражательных перегородок уменьшает потребное осевое усилие и соответственно влияет на выбор количества и моделей образателей потока, а также на необходимую фактическую потребляемую мощность P_1 , которая может быть снижена на 55-65%, в зависимости от конструкции и соответствующих отражательных перегородок.

Наиболее эффективной представляется конфигурация 3. Тем не менее, если сравнить конфигурацию 2 и конфигурацию 1, то видны преимущества заполнения углов в конкретном прямоугольном замкнутом резервуаре.

Выбрав требуемые образатели потока, необходимо обеспечить длительный срок эксплуатации оборудования. Для этого должны быть выполнены все требования по расположению оборудования, в частности расстояния от дна резервуара, от стенок канала, от заднего изгиба канала, а также от донной системы аэрации (если таковая установлена).

Пример из практики – результат изменения типа закругленных отражательных перегородок

Для конкретного проекта специалисты Grundfos выполнили CFD моделирование с целью проверки правильности выбора оборудования. Технологические резервуары были запроектированы как традиционные резервуары с замкнутым контуром с уровнем воды в резервуаре равным 7,7 м. Изогнутые торцевые перегородки резервуара были запроектированы как закругленные перегородки с удлиненными стенками (см. Рис. 43 ниже).

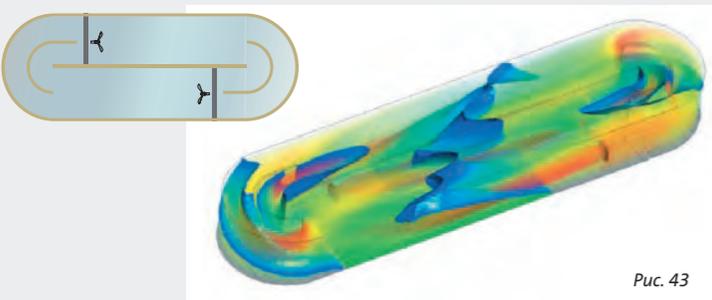


Рис. 43

Несмотря на то, что подобная конструкция направляющих стенок широко распространена, результаты CFD моделирования показали, что в данном случае такое решение не является оптимальным. Распределение потока у дна представляется весьма неоднородным, а в некоторых зонах резервуара высока вероятность осаждения твердых частиц. Специалисты Grundfos протестировали другую конфигурацию, чтобы проверить, уменьшится ли в этом случае вероятность осаждения. Результат показан на Рис. 44.

Другой важный результат касается потока в зоне образателей потока. Моделирование ясно показало неравномерное распределение потока у изгибов, что приводит к значительной разнице в скорости потока (см. Рис. 45). Из-за этого поток, доходящий до образателей потока, будет иметь очень неравномерную структуру.

Это может вызвать вибрацию образателей потока и тем самым сократить срок службы оборудования. В результате может вырасти стоимость технического обслуживания. Таким образом, очень важно выдерживать или даже превышать минимальное расстояние до изгиба резервуара.



Рис. 44

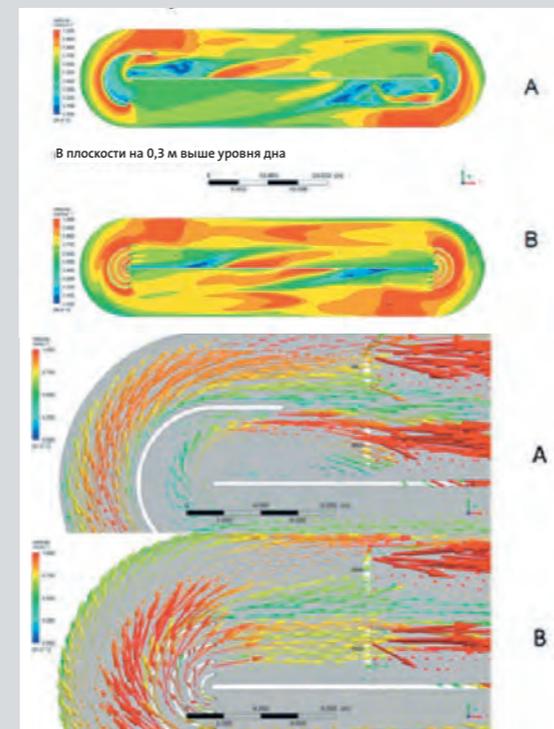


Рис. 45

Результат оптимизации выбора оборудования

Всякий раз, когда происходит какая-либо проблема с перемешиванием, и если имеется вся информация о геометрических параметрах резервуара, характеристиках сточных вод и специфических технологических процессах, инструменты расчета обеспечивают множество различных решений в плане выбора количества и модели перемешивающего устройства. Окончательный выбор определяется техническими факторами, например, соотношением между минимальной длиной резервуара или диаметром или шириной канала и уровнем воды в резервуаре, возможностью применения пропеллера выбранной модели для данного уровня воды в резервуаре, количеством перемешивающих устройств, соответствующим геометрическим параметрам резервуара и т. д.

И наконец, не менее важным фактором является энергопотребление.

ЗАМЕНА МЕШАЛОК ОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ПОТОКА

Одним из важнейших факторов в процессе работы очистных сооружений водоотведения являются эксплуатационные затраты. Служба эксплуатации должна учитывать потребление электроэнергии и стоимость технического обслуживания очистных сооружений. По оценкам, на долю мешалок и образателей потока приходится до 10% всей электроэнергии, потребляемой очистными сооружениями. Это значительное энергопотребление, но это несравнимо с электроэнергией, потребляемой оборудованием системы аэрации.

Тем не менее, если проанализировать процессы перемешивания и суспендирования для одного и того же объема жидкости, а также осевое усилие, необходимое для формирования объемного потока, то можно увидеть, что чем больше объем, тем более выгодным может быть применение образателей потока серии AFG вместо погружных мешалок серии AMD или AMG.

Преимущества образателей потока:

- Вероятность того, что потребуется меньшее количество перемешивающих устройств. Это означает экономию времени и средств на техническое обслуживание, а также сокращение расходов на монтажные принадлежности.

- Уменьшение суммарной потребляемой мощности P_1 и, соответственно, меньшее энергопотребление.
- Значительно больше общий поток и, соответственно, более частое прохождение жидкости общего объема через перемешивающие устройства за единицу времени.

В следующих примерах рассматриваются три прямоугольных резервуара A, B и C различного объема, но с одинаковым уровнем воды в резервуаре и с одинаковыми характеристиками сточных вод (концентрация твердых частиц $TS \leq 0,5\%$) (см. Таблицу 9 и Рис. 46).

РЕЗЕРВУАР	Объем [м³]	L x W [м]	WD [м]
A	1 500	15,0 x 25,0	5,0
B	3 500	14,0 x 50,0	5,0
C	4 500	18,0 x 50,0	5,0

Таблица 9

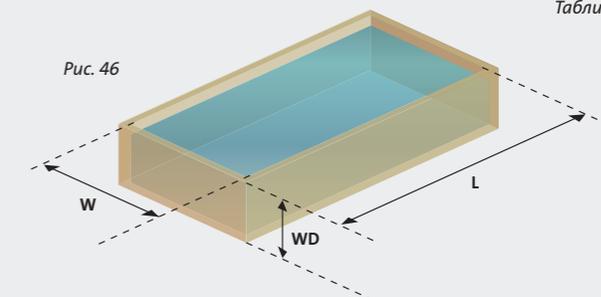


Рис. 46

В следующих таблицах 10, 11 и 12 указаны выбранные мешалки с высокой частотой вращения (Grundfos, серия AMG) и образатели потока с низкой частотой вращения (Grundfos, серия AFG), предназначенные для использования в резервуарах A, B и C соответственно (см. Рис. 47, 48 и 49), а также приводятся следующие данные:

- общее осевое усилие F
- общая фактическая потребляемая мощность $P_{1\text{actual}}$
- общее соотношение осевое усилие-мощность R_{FP}
- время перемешивания

Время перемешивания – это время, необходимое для однократного прохождения объема резервуара через установленные перемешивающие устройства. Чем меньше время перемешивания, тем большее число раз в единицу времени перемешивается объем (кол-во раз в час).

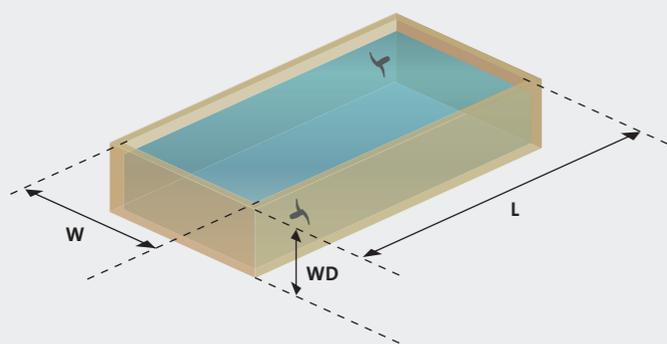
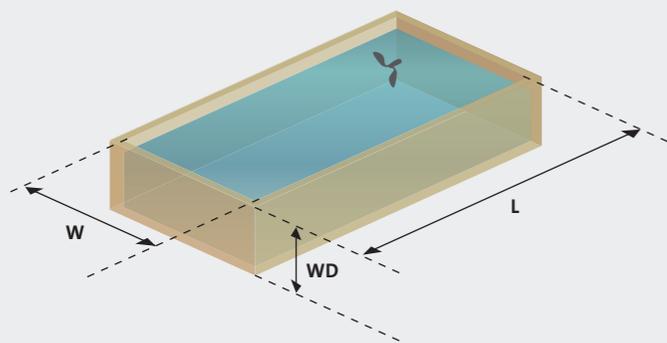


Рис. 47



РЕЗЕРВУАР А	Модель мешалки	Модель образателя потока
	AMG.30.64.336	AFG.30.260.34
Кол-во	2	1
Общее осевое усилие F [Н]	2 080	3 330
Общая мощность $P_{1 \text{ actual}}$ [кВт]	6,4	3,4
Суммарный поток [м ³ /ч]	2 922	10 704
R_{FP} [Н/Вт]	0,327	0,970
Время перемешивания [мин]	31	8,5

Таблица 10

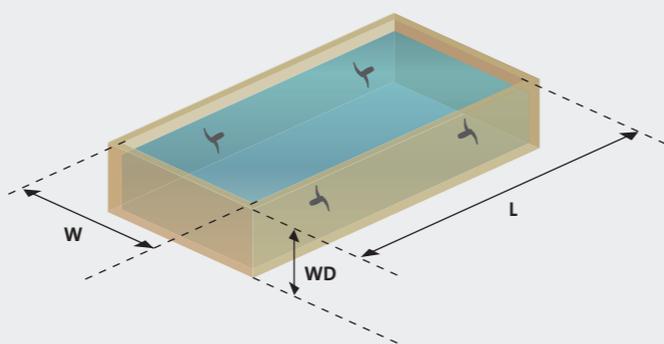
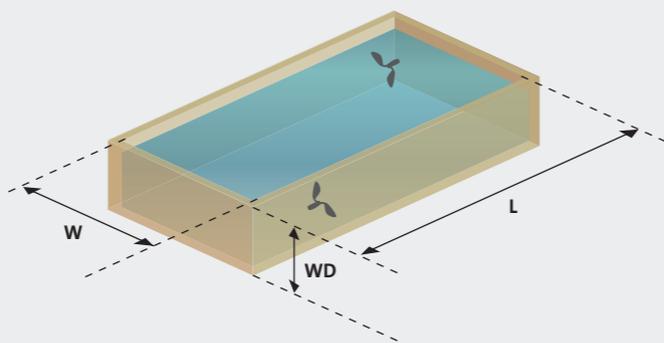


Рис. 48



РЕЗЕРВУАР В	Модель мешалки	Модель образателя потока
	AMG.30.64.336	AFG.30.260.34
Кол-во	4	2
Общее осевое усилие F [Н]	4 160	6 660
Общая мощность $P_{1 \text{ actual}}$ [кВт]	12,8	6,8
Суммарный поток [м ³ /ч]	5 844	21 408
R_{FP} [Н/Вт]	0,327	0,970
Время перемешивания [мин]	36	10

Таблица 11

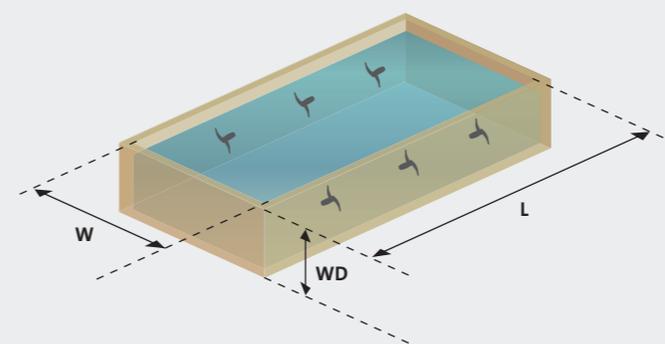
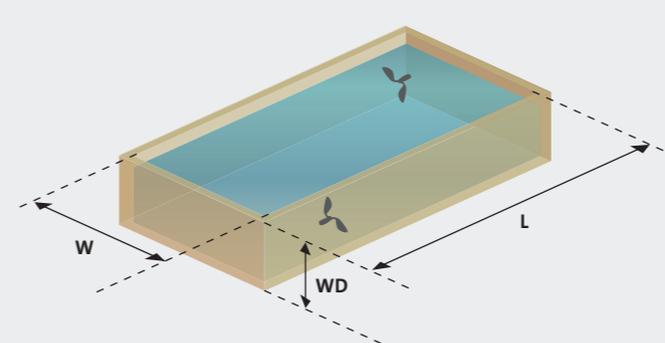


Рис. 49



РЕЗЕРВУАР С	Модель мешалки	Модель образателя потока
	AMG.30.64.336	AFG.30.260.34
Кол-во	6	2
Общее осевое усилие F [Н]	4 620	6 660
Общая мощность $P_{1 \text{ actual}}$ [кВт]	14,4	6,8
Суммарный поток [м ³ /ч]	7 542	21 408
R_{FP} [Н/Вт]	0,322	0,970
Время перемешивания [мин]	36	13

Таблица 12

В таблице 13 приводятся данные по ежегодным объемам энергосбережения за счет использования образателей потока вместо погружных мешалок в резервуарах А, В и С соответственно. Разумеется, необходимо учитывать различные инвестиционные расходы на установку погружных мешалок и образателей потока, а также возможное время окупаемости инвестиций с учетом снижения энергопотребления.

Необходимо также отметить, что возможность применения образателей потока в квадратных, прямоугольных и цилиндрических резервуарах зависит от размеров и формы резервуара, а в некоторых случаях и от требований, обусловленных технологическими процессами.

ДААННЫЕ	Резервуар А	Резервуар В	Резервуар С
$\Delta P_{1 \text{ actual}}$ [кВт]	3,0	6,0	7,6
Ежегодное энергосбережение [кВт/ч]	26 280	52 560	66 576

Таблица 13

ПРИМЕР ИЗ ПРАКТИКИ: ЗАМЕНА МЕШАЛОК ОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ПОТОКА НА ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ DOUCHU, ФРАНЦИЯ

Данный проект предусматривал реконструкцию существующих радиальных резервуаров ливневых вод для последующего использования их в качестве технологических емкостей (см. Рис. 50).

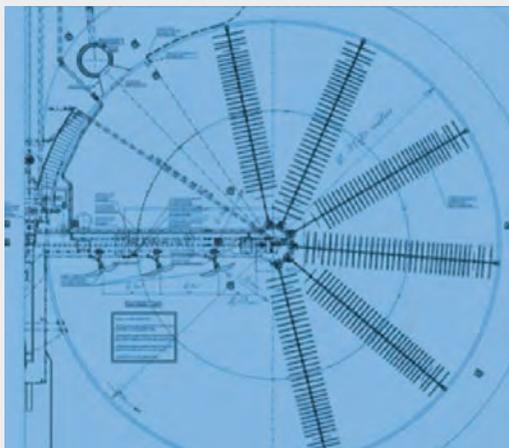


Рис. 50

В резервуаре ливневых вод были установлены погружные мешалки, но этих мешалок было бы недостаточно для перемешивания жидкости в технологическом резервуаре из-за используемой донной трубчатой системы аэрации. Проектировщики учли данное требование. А в целях энергосбережения резервуар был оснащен образвателями потока.

Однако проектировщики предположили, что образватели потока должны быть расположены в тех же местах, что и существующие мешалки. На основании такой компоновки специалисты Grundfos предложили решение, предусматривающее использование трех образвателей потока производства Grundfos модели AFG 4.0 с электродвигателем мощностью 4,0 кВт.

Проблемой был выбор расстояния от образвателя потока во внутренней части резервуара до обвязки трубчатой системы аэрации, поскольку общие рекомендации Grundfos в данном случае не подходили. По этой причине специалисты Grundfos решили выполнить CFD моделирование. Результаты CFD моделирования показаны на Рис. 51 и 52.

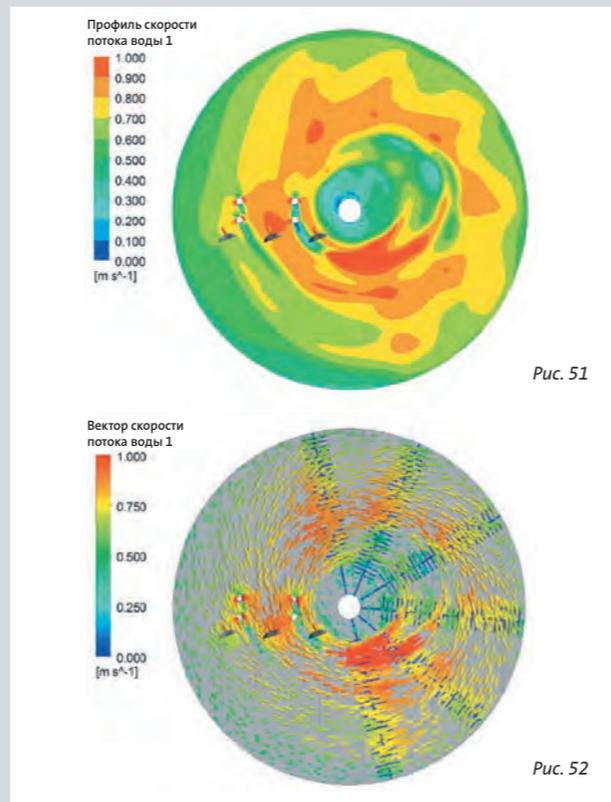


Рис. 51

Рис. 52



Рис. 53

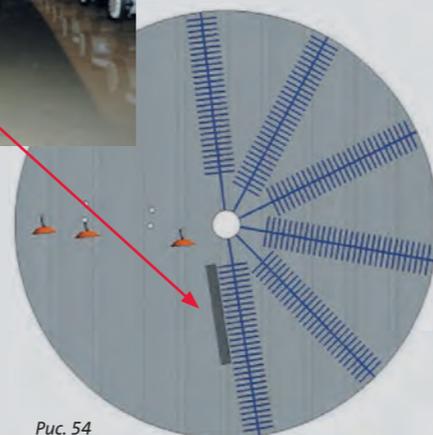


Рис. 54

Результаты CFD моделирования показали очень высокую скорость потока у обвязки системы аэрации, что могло привести к повреждению системы. Было протестировано несколько вариантов решения данной проблемы. В итоге было принято решение установить стальной защитный барьер перед первой аэрационной обвязкой (пример барьера см. на Рис. 53). Это позволило исключить риск серьезных повреждений и, соответственно, дорогостоящий ремонт.

Результаты CFD моделирования показали, что скорость потока в резервуаре была бы выше необходимой, как при включенной, так и при выключенной системе аэрации. Кроме того, распределение потока было не оптимальным. Для обеспечения более эффективного потока было предложено расположить образватели потока иным образом (см. Рис. 54), а также установить барьер для защиты системы аэрации.

Было решено проанализировать возможность использования небольших образвателей потока, поскольку согласно результатам CFD моделирования скорость потока в резервуаре была все еще велика (см. Рис. 55 и 56).

Дополнительное CFD моделирование подтвердило правильность предположения, что небольшие образватели потока способны обеспечить скорость 0,3 м/с. Мощность электродвигателя можно было уменьшить с 4,0 кВт до 2,4 кВт, тем самым сократив ежегодное энергопотребление на 40%, что соответствует более чем 42 000 кВт в год. Оптимизированное решение показано на Рис. 57.

Результаты оптимизации, достигнутой за счет применения CFD моделирования, были следующими:

- Исключение риска серьезного повреждения системы аэрации
- Выбор иного расположения образвателей потока обеспечил более эффективное использование потока
- Снижение энергопотребления на 40%

Очистные сооружения водоотведения были введены в эксплуатацию в 2011 году.

Результаты – профили скорости потока

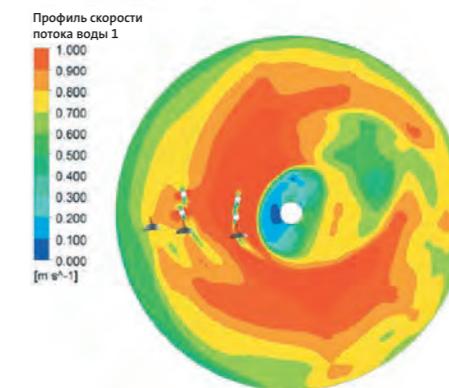


Рис. 55

Результаты – векторы скорости потока

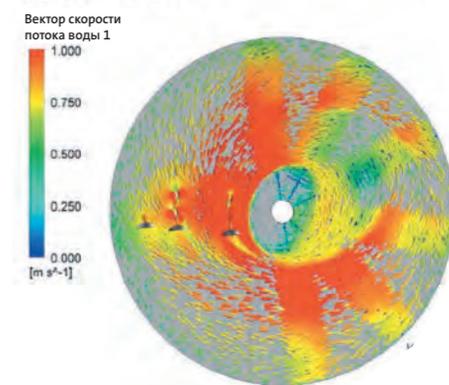


Рис. 56

Профили скорости потока

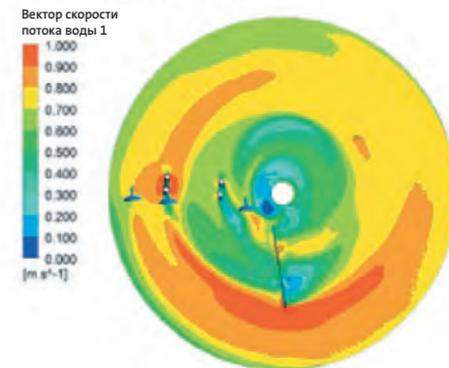


Рис. 57



**УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ,
СИМВОЛЫ И ЕДИНИЦЫ
ИЗМЕРЕНИЯ**

Условные обозначения, символы и единицы измерения

C	минимальное расстояние от пропеллеров до изгиба резервуара позади образвателей потока [м]
C_r	минимальное расстояние позади пропеллеров до стенки [м]
C_o	минимальное расстояние от пропеллера до препятствия [м]
C_D	минимальное расстояние от пропеллера до первого ряда диффузоров в аэрируемых квадратных/прямоугольных/цилиндрических резервуарах [мм]
C_F	минимальное расстояние от пропеллера до первого ряда диффузоров в замкнутых канальных резервуарах [м]
C_M	минимальное расстояние от последнего ряда диффузоров до края продольной перегородки резервуара [м]
C_R	минимальное расстояние от пропеллера позади образвателей потока до ближайшего ряда диффузоров [м]
D	диаметр пропеллера [мм]
D_i	внутренний диаметр резервуара в форме кольцевого канала [мм]
D_o	внешний диаметр резервуара в форме кольцевого канала [мм]
D_c	минимальное расстояние от пропеллеров до изгиба резервуара перед образвателями потока [м]
D_s	минимальное расстояние между пропеллерами последовательно установленных образвателей потока [м]
d	диаметр цилиндрического резервуара [м]
F	осевое усилие [Н]
h	геометрический напор [м]
h_w	уровень воды в резервуаре [м]
h_S	минимальная глубина погружения пропеллера [м]
h_{min}	минимальное расстояние от пропеллера до дна резервуара [м]
h_D	минимальное расстояние по вертикали от края лопасти пропеллера до диффузоров в полностью аэрируемых резервуарах [м]
H	динамический напор [м]
L_C	длина прямого канала [м]
L₁	минимальное расстояние от края лопасти пропеллера до первого ряда диффузоров в аэрируемых квадратных/прямоугольных резервуарах [мм]
L₂	минимальное расстояние от осевой линии пропеллера до первого ряда диффузоров позади образвателя потока/мешалки в аэрируемых квадратных/прямоугольных резервуарах [мм]
n	количество перемешивающих устройств [-]
P	гидравлическая мощность (рассеянная мощность) [Вт]
P₁	входная (потребляемая) мощность [Вт]
q	объемная скорость потока, создаваемого мешалкой/образвателем потока [м ³ /с]
r	радиус [мм]
R_{FP}	соотношение осевое усилие-входная мощность [Н/Вт]
Re	число Рейнольдса [-]
S	сторона квадратного резервуара [м]
Sdeg	степень суспендирования [-]
S_w	минимальное расстояние от пропеллера до боковой стенки [м]
S_t	минимальное расстояние между краем лопастей пропеллеров соседних перемешивающих устройств [м]

TS	общая концентрация твердых частиц [% или мг/л]
W	ширина замкнутого резервуара канального типа [м] или ширина прямоугольного резервуара [м]
μ	динамическая (или абсолютная) вязкость [сР или мПас]
v	кинетическая вязкость [м ² /с]
η	КПД мешалки [%]

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

DN-N

Аббревиатура, означающая «*Процесс денитрификации-нитрификации*»; основная технологическая линия обработки, известная как «модифицированный процесс удаления азота Луздака-Эттингера». Данный процесс предусматривает денитрификацию (аноксидный процесс) с последующей нитрификацией (аэробный процесс), после чего нитраты снова поступают в резервуар денитрификации. Вторичный ил также частично возвращается в виде возвратного активного ила (RAS) в резервуар денитрификации.

RAS

Аббревиатура, означающая «*Возвратный активный ил*»; данный процесс предполагает рециркуляцию осажденного активного ила из резервуара вторичного осаждения в резервуар биологической очистки, для поддержания нужного уровня содержания MLSS (концентрация ила). Расход RAS может превышать расход сточных вод в 0,5–1,5 раза, в зависимости от концентрации MLSS и концентрации возвратного активного ила.

MLR

Аббревиатура, означающая «*Рециркуляция иловой смеси*» (т.е. смеси сточных вод с активным илом). Это процесс внутренней рециркуляции нитратов (NO₃), образовавшихся в зоне нитрификации, в зону денитрификации. Расход MLR может превышать расход сточных вод в 5 и более раз, в зависимости от требуемой степени очистки азотной группы.

EBPR

Аббревиатура, означающая «*Процесс биологического удаления фосфора*».

A2O

Аббревиатура, означающая «*Анаэробный, анноксидный, аэробный*»; основная технологическая схема очистки стоков с удалением азота и фосфора. В то время как нитраты возвращаются в анноксидную зону, возвратный активный ил (RAS) частично возвращается в анаэробную зону, в которой происходит процесс биологического удаления фосфора (EBPR).

БПК₅

Биологическая потребность в кислороде – количество кислорода, необходимое для окисления органических биоразлагаемых составляющих в результате жизнедеятельности микроорганизмов. БПК определяет количество биоразлагаемых углеродных соединений.

DO

Аббревиатура, означающая «*Растворенный кислород*»; представляет концентрацию растворенного кислорода в воде. В области очистки сточных вод, значение требуемого DO может варьироваться от 0,5 мг/л до 3,0 мг/л, в зависимости от технологического процесса и характеристики сточных вод. В процессе проектирования при расчете скорости переноса кислорода среднее значение DO обычно принимается равным 2,0 мг/л.

ЧРП

Аббревиатура, означающая «*Частотно-регулируемый привод*». Это система управления частотой вращения ротора электродвигателя переменного тока путем регулирования частоты электрического тока, подаваемого на электродвигатель.

СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

«Насосы. Испытания. Погружные мешалки для сточных вод и подобных областей применения». ISO 21630

«Применение мешалок в резервуарах активного ила на очистных сооружениях – информация по планированию, проектным разработкам и строительству». Документ 24656 Союза немецких машиностроителей (VDMA), Германия

«Потенциальное энергосбережение при перемешивании в системе горизонтального потока». Б. Киллерих, Grundfos WU, Бьеррингбро, Дания; Э. Янг, Научно-исследовательский центр Grundfos, ВГД-моделирование, Сучжоу, Китай.

«Перемешивание в перерабатывающих отраслях промышленности», А. У. Ниноу, М. Ф. Эдвардс, Н. Хэмби

«Проектирование и производство очистных сооружений водоотведения – обработка и повторное использование сточных вод». Metcalf & Eddy Inc. – США

«Биологическое удаление фосфора – Руководство по проектированию и эксплуатации». П. М. Дж. Янссен, К. Мейнема, Х. Ф. Ван Ден Ройст – DHV Water BV, Нидерланды

«Аэрация: принципы и практика». Й. А. Мюллер, У. К. Бойл, Х. Й. Пепель, США/Германия