

* *
*

УДК 532.51

DOI: 10.17223/00213411/64/2/82

PU XING¹, HUI HU¹, YILIN CHEN¹, HUI WU¹, TSUNG-CHOW SU²**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРАТОРА ***

С учетом характеристик линейных и рабочих параметров лопаток поверхностного аэратора предложен аэродинамический профиль с логарифмической спиралью в качестве шины и NACA0012-профиль в качестве поперечного сечения для решения проблем распределения скорости, низкой эффективности, сложного контроля содержания растворенного кислорода и противоречия между способностью заполнения кислородом и энергоэффективностью при работе аэратора. Программное обеспечение CFD Fluent использовалось в качестве технологии численного моделирования и анализа влияния аэродинамической лопатки на массоперенос кислорода, перемешивание и проталкивание потока в окислительной канаве. Экспериментально изучены три фактора: скорость вращения крыльчатки и глубина ее погружения, а также угол наклона лопастей. Установлена максимальная динамическая эффективность двух видов крыльчатки с разным углом наклона лопастей.

Ключевые слова: окислительная канава, аэродинамический профиль, поверхностный аэратор, численное моделирование CFD.

Введение

С ростом загрязнения воды и необходимостью защиты окружающей среды разработка и оптимизация оборудования для очистки сточных вод становятся все более важными [1]. Поверхностные аэраторы широко используются при очистке сточных вод благодаря своей простой конструкции, высокой эффективности массопереноса кислорода и отличному перемешивающему эффекту [2]. Более того, для увеличения производительности очистки и решения проблемы энергозатрат поверхностный аэратор с высокой эффективностью и низким энергопотреблением стал основным объектом исследований в области технологий очистки сточных вод.

В работе [3] использовано численное моделирование для прогнозирования общего коэффициента массопереноса кислорода и эффективности аэратора с изогнутой поверхностью лопасти при разной скорости вращения, глубине погружения и угле наклона лопасти. В [4] изучено влияние угла наклона лопастей, их количества и формы. Было установлено, что дефлекторное полотно оказывает максимальное влияние на массоперенос кислорода. Авторами [5] проведены модельный и полноразмерный эксперименты в изучении вертикального аэратора. Было обнаружено, что увеличение диаметра, количества лопастей и скорости их вращения повышают коэффициент массопереноса и содержание растворенного кислорода, а также были найдены оптимальные скорость вращения и глубина погружения. В работе [6] исследован внутренний двухфазный поток аэратора с перевернутым зонтиком, представлены результаты моделирования поля потока, распределения линий тока и скоростей. Деформация свободной поверхности и кинетическая энергия турбулентности анализируются во времени и на радиальных профилях, отобранных в нескольких вертикальных положениях. В [7] разработаны две математические модели для оптимизации динамических характеристик аэродинамического профиля аэратора в воде. Было обнаружено, что надежный метод оптимизации имеет лучшую стабильность. Авторами [8] моделировались гидродинамические характеристики осевого насоса с аэродинамической лопастью. В результате найдено оптимальное аэродинамическое сопротивление аэродинамического профиля. Мешалка с аэродинамическим профилем для отвода тепла, разработанная в [9], пассивно вращается под действием воздуха, что может улучшить конвекционную теплопередачу воздуха. Путем численного моделирования и экспериментальной проверки было обнаружено, что аэродинамическая мешалка может значительно улучшить эффект конвекционной теплопередачи воздуха [10]. В работе [11] использован динамический анализатор частиц (PAD) для измерения изменения окислительной канавы перевернутого зонтичного аэратора в лаборатории, была проведена верификация результатов численного моделирования.

* Исследование поддержано Национальным фондом Китая 51768045.

На ранней стадии поиска оптимальной конструкции мы исследовали поверхностный азратор с изогнутыми лопастями и смоделировали эффект смешивания потока такими лопастями в емкости азрации (резервуаре азрации) методом конечных элементов ANSYS [12]. На основе оптимальной конструкции предлагается новая лопасть поверхностного азратора. Шина лопасти представляет собой логарифмическую спираль, расположенную регулярно, а ее поперечное сечение имеет характеристики профиля серии NACA001 [13]. Лопасть обладает превосходной способностью смешивать логарифмические винтовые линии и отличные аэродинамические характеристики. Программное обеспечение FLUENT использовалось для моделирования и расчета процесса перемешивания. Параметры азрации при различной глубине погружения аэродинамической лопадки, ее скорости вращения и угле наклона были измерены пропорциональным тестом. В результате анализа установлено влияние различных параметров на производительность азратора, найдена конфигурация двух рабочих колес с оптимальной динамической эффективностью для случая разного наклона лопастей.

1. Численное моделирование

1.1. Имитационная модель и выбор сетки вычислений

Модель (рис. 1) состоит из круглого резервуара азрации и крыльчатки с аэродинамическим профилем [14, 15]. Высота и диаметр модели резервуара азрации составляют 60 и 1000 мм соответственно. Лопадка с аэродинамическим профилем была создана с помощью параметрического моделирования. Угол наклона составлял 5 или 10°. Далее без специального упоминания использовалась крыльчатка с углом наклона лопастей 10°.

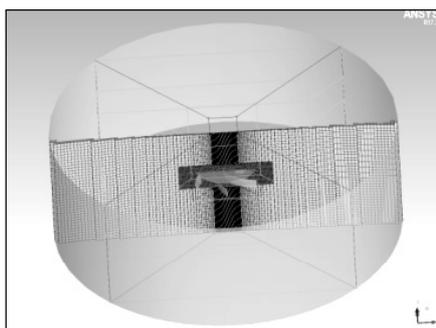


Рис. 1. Расчетная сетка резервуара азрации

Область расчета была разделена на две части: внешнюю и внутреннюю. Это было связано с тем, что неструктурированная сетка имеет хорошую адаптируемость и может лучше подходить к аэродинамической поверхности лопасти. Для оптимального соответствия специальной поверхности профиля лопаток внутренняя вычислительная область была разделена на неструктурированную сетку. Ее размер в объеме расчетной области ограничивался значением ниже 8. Затем сетка на поверхности лопастей была уточнена и размер сетки был ограничен значением 5. Размерное соотношение было выбрано равным 1.2 и получено 577 000 ячеек.

Внешняя вычислительная область была разделена структурированной сеткой. Технология O-BLOCK использовалась для сегментирования блоков, затем были построены отношения отображения между блоками и вычислительной областью для создания структурированной сетки. Ее максимальный размер был установлен равным 10, что создало 850 000 структурированных сеток, каждая из которых имела качество более 0.7. Гибридная сетка была получена путем объединения структурированных и неструктурированных сеток, т.е. всего 1.427 млн ячеек.

1.2. Выбор граничных условий

Окружная и нижняя поверхности резервуара азрации были заданы как стенки, а верхняя поверхность – как область выхода давления. Для моделирования вращения лопасти была использована технология скользящей сетки. Кроме того, было задано вращение внутренней расчетной области со скоростью вращения 30 рад/с. Метод объема жидкости (Volume Fluid Method, VOF) использовался для описания границы раздела воздух – вода для определения формы поверхности

свободной от жидкости. Так как модель турбулентности RNG $k-\epsilon$ подходит для потока с низким числом Рейнольдса, то для повышения точности, особенно точности вихревой турбулентности [16, 17], была применена модель RNG $k-\epsilon$ [18]. Глубина погружения крыльчатки в исходном состоянии составляет 20 мм, а газожидкостное распределение в резервуаре аэрации задается патч-функцией [19]. Каждые 0.004 с совершался шаг, а каждая итерация выполнялась до 80 раз.

1.3. Анализ результатов моделирования

Результаты обогащения кислородом при перемешивании крыльчаткой, полученные при численном моделировании, показаны на рис. 2. Объемные доли воздуха и воды на свободной поверхности составляют по 50%. В это время состояние потока в резервуаре аэрации имеет тенденцию быть стабильным, а в районе крыльчатки появляется дискообразное углубление. Над краем «лезвия» наблюдается ускорение жидкости вдоль его передней части под действием вращения. Жидкость выбрасывается на конце «лезвия», образуя гидравлический скачок. Под действием силы тяжести разбрызгивающаяся жидкость образует водяную завесу, которая падает и уносит большое количество воздуха к поверхности жидкости, доставляя большое количество кислорода воде, находящейся у поверхности жидкости. Выходящий из струи столб жидкости под действием силы тяжести диффундирует, образуя водяную завесу. Жидкость непосредственно под «лезвием» непрерывно ускоряется вдоль передней его части и достигает максимальной скорости при прохождении через его кончик. Согласно формуле забора воздуха при гидравлическом скачке, забор воздуха пропорционален скорости в этот момент, следовательно, эффективность массообмена кислорода повышается с увеличением скорости вращения.

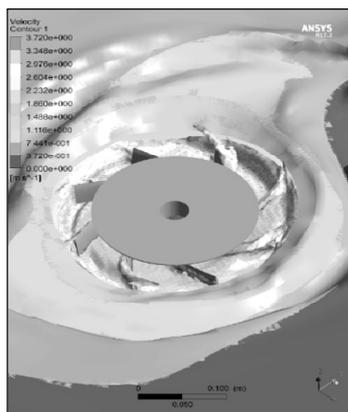


Рис. 2. Гидравлический скачок над уровнем свободной жидкости в резервуаре аэрации

Высокоскоростное вращение аэратора в пропорциональном тесте показано на рис. 3. Вид сверху поверхности жидкости, полученной при численном моделировании, представлен на рис. 4.

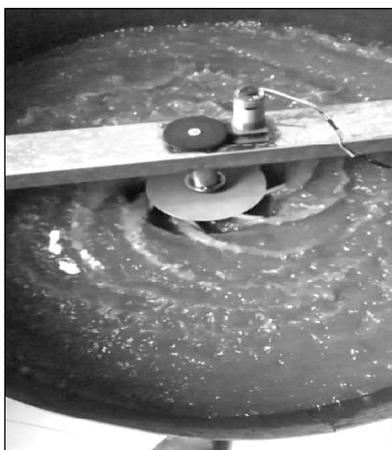


Рис. 3. Вид сверху поверхности свободной жидкости в резервуаре аэрации

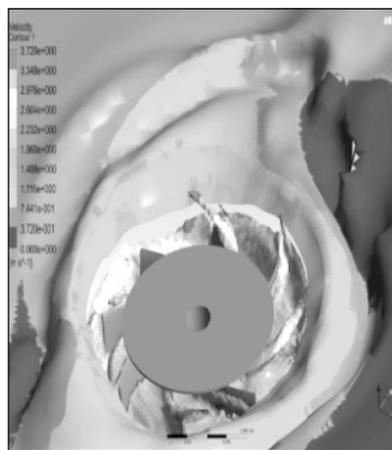


Рис. 4. Численное моделирование поверхности жидкости

Брызги жидкости при гидравлическом скачке наблюдались на обоих снимках. На рис. 3 черная область на задней части лопасти вращается вместе с крыльчаткой, наполняясь большим количеством воздуха. Воздух в зоне отрицательного давления смешивается с жидкостью и растворяется в ней, образуя турбулентный вихрь. Наполненная пузырьками жидкость поднимается вдоль заброса лопастей, образуя гидравлический скачок. Вид сверху свободной поверхности жидкости, полученной при численном моделировании, соответствует виду в эксперименте и подтверждает надежность моделирования.

Вид снизу поверхности свободной жидкости и диаграмма скоростного облака показаны на рис. 5. Можно наблюдать газожидкостную смесь в центральной области, имеется множество пузырьков различной формы и размера на стенке резервуара аэрации. Жидкость у поверхности воды сначала была ускорена вращением лопастей аэратора, причем горизонтальная составляющая скорости намного больше вертикальной в процессе ускорения. Волны на свободной поверхности сталкиваются с поверхностью цилиндрической стенки до того, как состояние движения жидкости во всем резервуаре аэрации стабилизируется. Часть ее стекает вниз, выталкивая циркулирующую в резервуаре аэрации жидкость; другая часть движется в направлении лезвия, а большое количество воздуха сталкивается со вторым потоком. Взвешенные в воде пузырьки имеют тенденцию вращаться при движении вверх. Движение пузырьков в воде увеличивает эффективность аэратора.

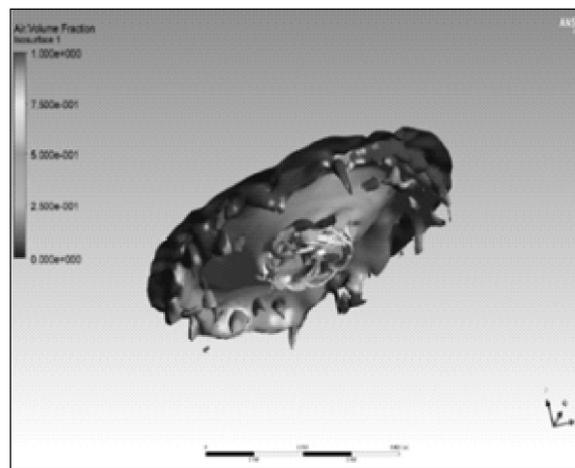


Рис. 5. Вид на свободную поверхность снизу

Контуры скорости и линии тока вертикального поперечного сечения в резервуаре аэрации в разные моменты времени показаны на рис. 6. Видно, что через 0.16 с (рис. 6, а) лопасть аэратора начинает вращаться, при этом изменяется только скорость жидкости на конце лезвия. В следующий момент времени (рис. 6, б) с увеличением области действия лопасти ускоряющей причиной являются жидкость у поверхности и поток воздуха над ней. Из сравнения изображений на рис. 6, в с приведенными картинками до 1.21 с видно, что с увеличением скорости жидкости на дне бассейна зона воздействия под лопаткой становится глубже. Сопоставим рис. 6, е с рисунками до 2.56 с. Площадь всей темной области постепенно уменьшается. Остается только центральная область дна резервуара и область контакта дна со стенкой. Вообще говоря, скорость потока в большей части резервуара аэрации была значительно увеличена. К 4.09 с (рис. 6, з) подводный циркуляционный вихрь симметрично распределяется по центру, глубина воздействия циркуляционного вихря достигает дна. Под действием подъемной силы жидкость обратного потока собирается под лопастью, а затем подбрасывается лопастью в воздух, что приводит к гидравлическому скачку в открытом канале. Из контуров скорости можно сделать вывод, что скорость в центре дна и области контакта дна со стенкой может быть ниже 0.2 м/с, поэтому существует риск образования осадка и отложения.

На рис. 7 приведены поверхность свободной жидкости в резервуаре аэрации и трехмерная диаграмма. Жидкость на дне бассейна движется в направлении стрелки, ускоряется и сходится под лопастью, достигает максимальной скорости на конце лезвия, а затем разбрызгивается в воздух под действием лезвия. В месте расположения центрального отверстия непосредственно под крыльчаткой находится поток завихрения, что указывает на незначительное изменение скорости. В этой области скорость жидкости низкая, тренд линии потока изменяется медленно, а интенсив-

ность турбулентности мала. На этом рисунке показана область, соответствующая скорости жидкости около 0.2 м/с, в которой, вероятно, возникнет отложение ила.

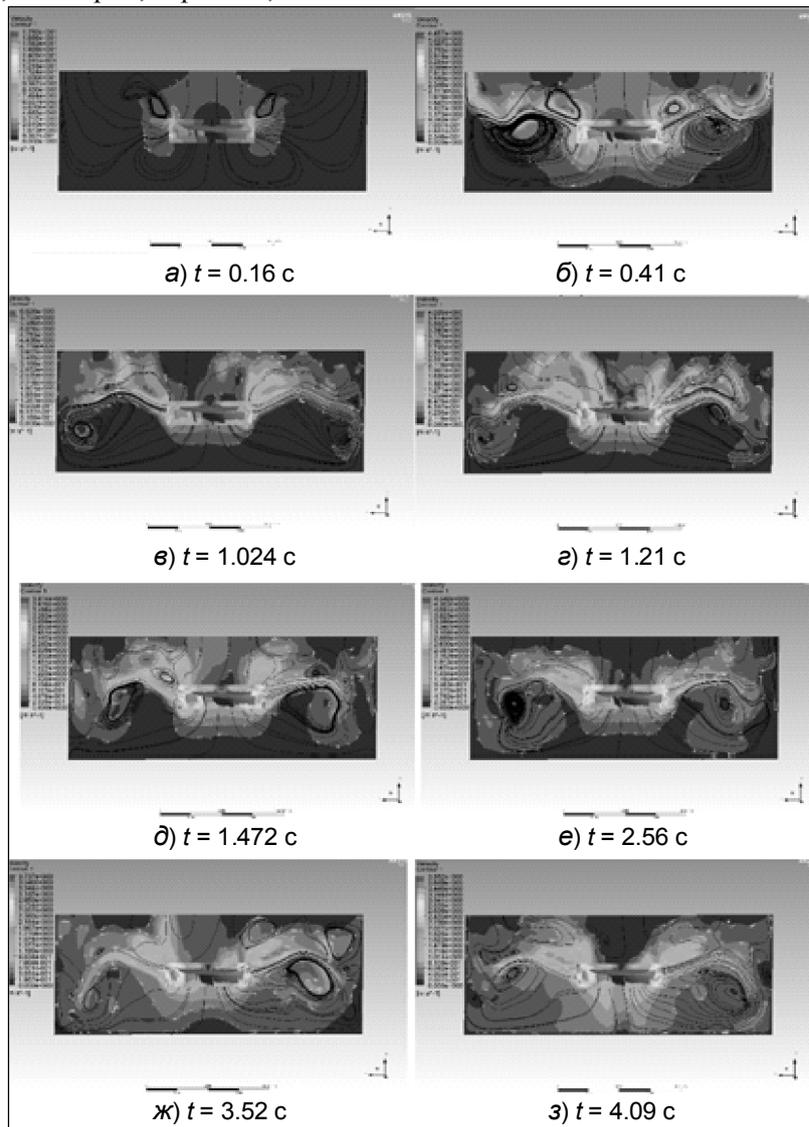


Рис. 6. Изолинии скорости и диаграмма линий тока в вертикальном разрезе в разное время

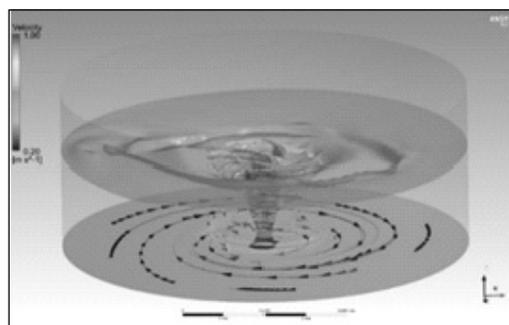


Рис. 7. Свободная поверхность и трехмерная диаграмма

Диаграмма распределения скоростей и двумерная диаграмма обтекания формы в осевом разрезе на разных глубинах от поверхности жидкости представлены на рис. 8. Из изменения оттенков на разных уровнях видно, что расход жидкости в поперечном сечении постепенно уменьшается по мере увеличения глубины. Распределение скорости на мелководье неравномерно, особенно в положении $H_z = 0$ мм (рис. 8, а). Вблизи стенки направление потока изменяется за счет комбини-

ванного действия стенки и периферийной вращательной циркуляции, в результате чего жидкость протекает вдоль стенки кольцевидно. Площадь проекции поперечного сечения лопасти в вертикальном направлении велика, поэтому эффект осевого потока сильный, а интенсивность турбулентности около крыльчатки намного больше, чем в других местах [20]. Скорость жидкости в области мелкого слоя наблюдалась самая большая, при этом неустойчивость потока очевидна. Центральная область различных областей жидкости – темного цвета. Это указывает на то, что скорость жидкости в центральном положении и области непосредственно под крыльчаткой относительно мала, что может легко сформировать застойную область потока, в результате чего образуется застой и осаждение ила. В глубоководной области жидкость (рис. 8, *е*) медленно поднимается под действием подъемной силы, а ее скорость распределена равномерно. Линии тока на рисунке похожи на спирали и сходятся к центру по стрелкам.

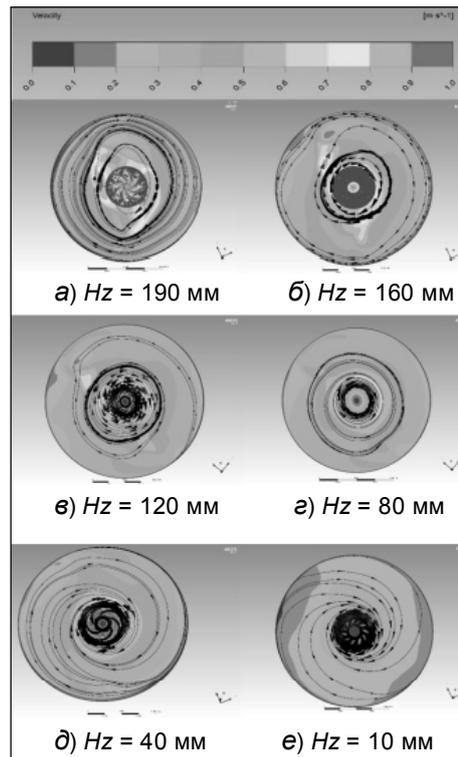


Рис. 8. Распределение скоростей и двухмерная диаграмма потока (Гц-уровень жидкости)

2. Испытание аэратора

2.1. План испытаний

На рис. 9 [21] представлен испытательный стенд. На основе учета геометрического и кинематического подобия экспериментальной модели для построения пропорционального теста на динамическое подобие используется критерий Фруда [22]. Выбираются двигатель, трансмиссионный вал, редуктор, блок питания и регулятор стенда. Два рабочих колеса с углами наклона лопастей 5 и 10° изготовлены для тестирования. Изменение концентрации кислорода в резервуаре аэрации измеряется портативным измерителем растворенного кислорода Z8403. Счетчик тока используется для определения расхода воды. Модель резервуара аэрации имеет диаметр 1000 мм и высоту 600 мм. В ходе испытания были измерены и рассчитаны характеристики аэрации с четырьмя скоростями 80, 110, 140 и 170 об/мин при глубине погружения 10,



Рис. 9. Испытательный стенд

при глубине погружения 10,

20, 30 и 40 мм. При сохранении объема жидкости постоянным для определения содержания кислорода в воде используется метод периодической нестационарной обработки.

Полный коэффициент переноса кислорода в стандартных условиях $K_{La(20)}$, оксигенационная способность Q_S и динамическая эффективность E_S используются в качестве оценочных показателей эффективности аэратора. Выражение общего коэффициента передачи кислорода K_{La} :

$$K_{La} = \frac{\ln(C_S - C_{t1}) - \ln(C_S - C_{t2})}{t_2 - t_1}, \quad (1)$$

где C_{t1} , C_{t2} – концентрации кислорода в воде в моменты времени t_1 и t_2 , мг/л.

Общий коэффициент переноса кислорода $K_{La(T)}$ модифицируется:

$$K_{La(20)} = K_{La(T)} \cdot 1.024^{(20-T)}, \quad (2)$$

где $K_{La(20)}$, $K_{La(T)}$ – полные коэффициенты переноса кислорода в стандартных условиях (в воде при температурах воды 20 °С) и при текущей температуре; 1.024 – экспериментальный поправочный коэффициент.

Окислительная способность Q_S рассчитывается как

$$Q_S = K_{La(20)} \cdot V \cdot C_{S(20)}, \quad (3)$$

где $C_{S(20)}$ – концентрация насыщения растворенного кислорода в воде при стандартных условиях, мг/л; V – объем воды в резервуаре аэрации, л.

Стандартная динамическая эффективность аэратора E_S – это способность растворять кислород в воде при стандартных условиях, когда процесс массопереноса кислорода потребляет киловатт-час электроэнергии:

$$E_S = \frac{Q_S}{P_S}, \quad (4)$$

где P_S – выходная мощность аэратора, Вт; E_S – стандартная динамическая эффективность, мг/(мин·Вт).

2.2. Анализ результатов испытаний

Полный коэффициент переноса кислорода в стандартных условиях может прямо отражать скорость переноса и способность оборудования для аэрации. Его значения при различных глубинах погружения, углах лопастей и скоростях вращения приведены в таблице. Можно видеть, что полный коэффициент в стандартных условиях увеличивается с повышением скорости вращения. Выбор глубины погружения необходимо адаптировать к скорости вращения крыльчатки. Никакая фиксированная глубина погружения не подходит для всех скоростей вращения рабочего колеса. Когда глубина погружения колеса лопасти 5° составляет 10 мм, а скорость – 170 об/мин, стандартный коэффициент значительно снижается. Основная причина заключается в том, что увеличение скорости крыльчатки увеличивает работу, совершаемую над жидкостью.

Гидравлический скачок более выражен, а радиус влияния гидравлического скачка превышает радиус модели резервуара аэрации. В результате жидкость непрерывно выливается из модели и уровень жидкости понижается. Наконец, если глубина погружения уменьшается, то двигатель находится в состоянии холостого хода, что приводит к уменьшению значения коэффициента.

Полный коэффициент переноса кислорода в стандартных условиях

Скорость вращения n , рад/мин	Наклон 5°				Наклон 10°			
	Глубина погружения, мм				Глубина погружения, мм			
	10	20	30	40	10	20	30	40
80	0.0261	0.0259	0.0255	0.0213	0.0241	0.0201	0.0170	0.0173
110	0.0421	0.0539	0.0635	0.0435	0.0401	0.0561	0.0470	0.0402
140	0.1010	0.0965	0.0959	0.1053	0.1052	0.0735	0.0530	0.1040
170	0.0728	0.1416	0.1213	0.1152	0.1004	0.1206	0.1345	0.1155

Скорость рабочего колеса, глубина погружения и стандартная карта энергетической эффективности, полученные с интерполяцией данных, показаны на рис. 10. Результаты, представленные на рис. 10, *а*, демонстрируют, что при глубине погружения крыльчатки (лопатка 5°) на 40 мм и скорости вращения 80 об/мин энергоэффективность аэратора минимальна. Когда глубина погружения составляет от 15 до 25 мм, а скорость – от 150 до 170 об/мин, аэратор имеет эффективную рабочую зону. С помощью MATLAB для нахождения экстремального значения получено, что наилучшая рабочая точка находится в положении глубины погружения колеса 22.24 мм, скорости 164.5 об/мин, а его максимальная стандартная динамическая эффективность составляет 30.08 мг/(мин·Вт). При скорости ниже 130 об/мин изменение глубины погружения мало влияет на стандартную динамическую эффективность. Уменьшение происходит тогда, когда глубина погружения составляет 10 мм при скорости вращения 170 об/мин. Основная причина состоит в том, что жидкость над лопастью вытягивается из резервуара аэрации, в результате чего для крыльчатки на конце не хватает жидкости.

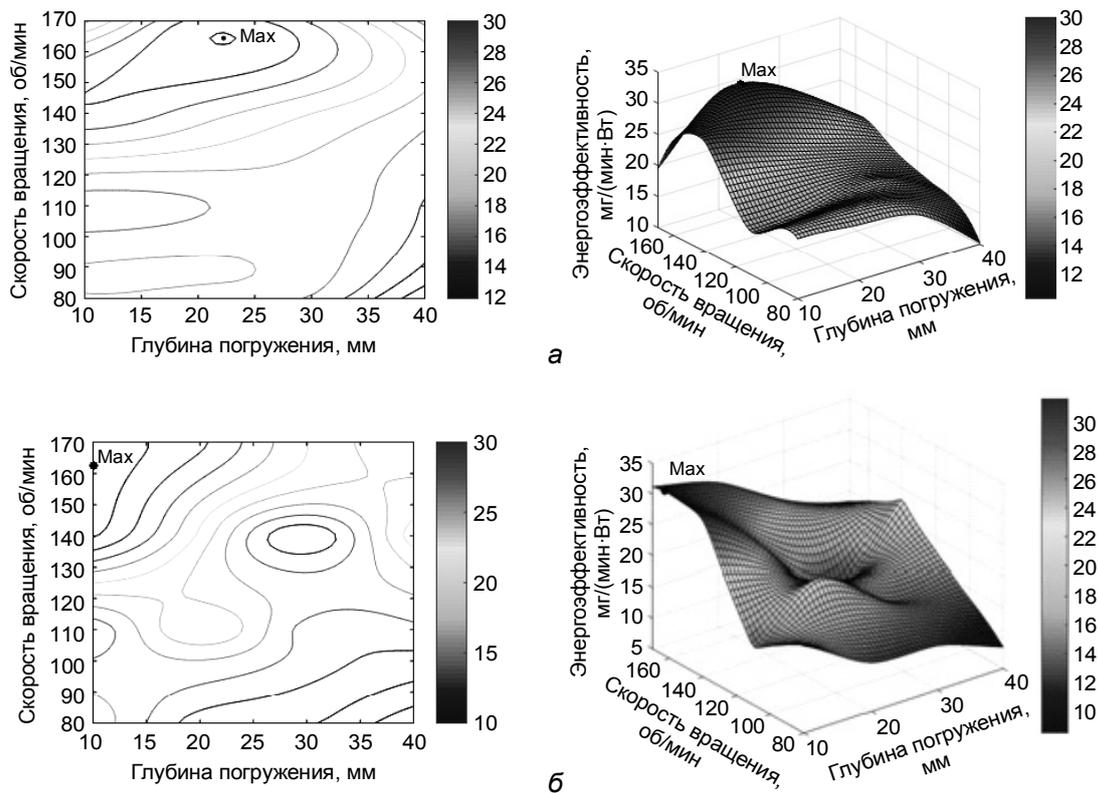


Рис. 10. Карты стандартной системы переноса кислорода с рабочими колесами под разными углами наклона лопастей: *а* – карта поверхности рабочего колеса (лопатка 5°) и трехмерное отображение; *б* – карта поверхности рабочего колеса (лопатка 10°) и трехмерная карта

При анализе рис. 10, *б* было обнаружено, что трехмерная карта поверхности представляет собой наклонную плоскость с областью нисходящего оврага в центре. Стандартная динамическая эффективность рабочего колеса (лопасть 10°) очень выражена. По мере увеличения скорости вращения колеса и уменьшения глубины его погружения стандартная энергоэффективность постепенно увеличивается. При глубине погружения 10 мм и скорости вращения 162.7 об/мин достигается точка оптимальной эффективности работы, а максимальная энергоэффективность составляет 31.5505 мг/(мин·Вт). Рабочая зона рабочего колеса с высокой эффективностью находится в диапазоне глубины погружения 10–15 мм и скорости 160–170 об/мин. Из результатов, показанных на трехмерной карте поверхности, следует, что стандартная динамическая эффективность крыльчатки имеет определенный диапазон улучшения при скорости вращения, превышающей 170 об/мин.

Выводы

Представлен новый тип поверхности лопасти аэратора с логарифмической спиралью в качестве шины и аэродинамическим профилем NACA0012 в качестве формы сечения. Исследование

проведено методами теоретического анализа, моделирования в рамках вычислительной гидродинамики (CFD) и с помощью экспериментальных измерений. С применением технологии численного моделирования (FLUENT), анализа сформированного на поверхности воды гидравлического скачка и распределения отрицательного давления на задней части лопасти и потока исследованы траектория и распределение жидкости по скоростям. Изложен процесс возникновения кислородного массопереноса в поле аэрации, что может теоретически обосновать последующие экспериментальные исследования.

Результаты показывают, что существует корреляция между стандартной производительностью аэратора и скоростью вращения крыльчатки. Зона эффективной работы аэратора нового типа появляется в условиях высокой скорости. Радиус гидравлического скачка в аэраторе больше в случае угла наклона лопастей до 5° , что позволяет легко ограничиться размерами тестовой модели. На больших скоростях стандартная динамическая эффективность аэратора с углом наклона лопастей 10° выше, и есть возможности ее улучшения с увеличением скорости вращения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wu Qinchen and Zhao Xinlong // *J. Shandong Agricultural Engineering College*. – 2017. – No. 5. – P. 99–102.
2. Cao Ruiyu, Chen Xiucheng, and Zhang Huanwen // *Water Supply and Drainage*. – 2002. – V. 28(10).
3. Thakre S.B., Bhuyar L.B., and Deshmukh S.J. // *Int. J. Environment. Sci. Technol.* – 2009. – V. 6. – No. 1. – P. 113–122.
4. Pan Zhe, Wang Jiaquan, and Fan Kui // *J. Environment. Eng.* – 2012. – V. 6. – No. 6. – P. 1936–1940.
5. Backhurst J.R, Harker J.H, and Kaul S.N. // *Water Res.* – 1988. – V. 22. – No. 10. – P. 1239–1243. (in Chinese)
6. Liang Dong, Jiawei Liu, Houlin Liu, et al. // *Adv. Mech. Eng.* – 2019. – V. 11. – No. 8. – P. 1–13.
7. Zhao Binjuan, Zhang Chenghu, Fu Yanxia, et al. // *J. Eng. Thermophys.* – 2008. – V. 39. – No. 09. – P. 1958–1964.
8. Cui Yingying. Numerical Simulation of Hydrodynamic Characteristics of Axial Flow Pump Airfoil. – Yangzhou university, 2009.
9. Zheng L., Xianchen X., Kuojiang L., et al. // *Int. J. Thermal Sci.* – 2018. – V. 133. – P. 284–298.
10. Гестрин С.Г., Старавойтова Е.В. // *Изв. вузов. Физика*. – 2019. – Т. 62. – № 6. – С. 57–63.
11. Fan L., Xu N., Wang Z., et al. // *Chem. Eng. Res. Design*. – 2010. – V. 88. – No. 1. – P. 23–33.
12. Xing P., Zhao J.Y., and Yin X.J. // *Adv. Mater. Res.* – 2011. – No. S1. – P. 199–200.
13. Hu Hui. Simulation Analysis and Experimental Study of Aerator Based on Airfoil Optimization Design Theory. – Nanchang: Nanchang Hangkong university, 2019.
14. Соловьева Ю.В., Валуйская Л.А., Липатникова Я.Д., Старенченко В.А. // *Изв. вузов. Физика*. – 2019. – Т. 62. – № 12. – С. 74–80.
15. Суханов Д.Я., Кузовова А.Е. // *Изв. вузов. Физика*. – 2019. – Т. 62. – № 12. – С. 107–113.
16. Qiu Binbin. Research on Optimization Design of Curved Impeller of New Type Inverted Umbrella Aerator. – Nanchang: Nanchang Hangkong university, 2014.
17. Ming Jiayi. Flow Analysis and Aeration Performance Study of Inverted Umbrella Aerator. – Nanjing: Jiangsu university, 2017.
18. Ласуков В.В. // *Изв. вузов. Физика*. – 2019. – Т. 62. – № 5. – С. 40–53.
19. Cao Zhixian, Zheng Li, and Qian Zhongdong // *J. Wuhan University (Engineering Edition)*. – 2010. – V. 43. – No. 2. – P. 137–142.
20. Li L., Wang J., Feng L., et al. // *Korean J. Chem. Eng.* – 2017. – V. 34. – No. 11. – P. 2811–2822.
21. JB/T 10670-2006 Industry standard inverted umbrella type surface aerator.
22. Finamore E.J., Frandzny J.B., Finamore J., et al. *Fluid Mechanics with Engineering Applications*. – Machine Industry Press, 2006.

Поступила в редакцию 12.11.2020.

¹ Nanchang Hangkong University, г. Наньчан, Китай

² Атлантический университет Флориды,
Колледж инженерии и информатики, г. Флорида, США

Pu Xing, Ph.D., Associate Professor of Nanchang Hangkong University, e-mail: xingpu@nchu.edu.cn;

Hui Hu, Bachelor Degree, Master Degree of Nanchang Hangkong University, e-MAIL: 1703085201013@stu.nchu.edu.cn;

Yilin Chen, Bachelor Degree, Master Degree of Nanchang Hangkong University, e-mail: 1803080202001@stu.nchu.edu.cn;

Hui Wu, Master Degree, Associate Professor of Nanchang Hangkong University, e-MAIL: 32008@nchu.edu.cn;

Tsung-chow Su, Ph.D., Professor and Director Undergraduate Research Florida Atlantic University, e-mail: su@fau.edu.