

УДК 66.021.1:66.063.8

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ В АППАРАТЕ С ДВУХЛОПАСТНОЙ МЕШАЛКОЙ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ТРАССЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

© 2022 г. К. А. Алексеев^а *, А. Г. Мухаметзянова^а

^а ФГБОУ ВО “Казанский национальный исследовательский технологический университет”, г. Казань, Россия

*e-mail: konstantin_aleks@inbox.ru

Поступила в редакцию 20.04.2021 г.

После доработки 26.09.2021 г.

Принята к публикации 29.09.2021 г.

Проведены результаты экспериментальных исследований полей скорости в малогабаритных аппаратах квадратного сечения с двухлопастными мешалками различных конструкций. Исследования проводились на лабораторной установке методом цифровой трассерной визуализации с помощью комплекса диагностики многофазных потоков “Полис”. В результате экспериментов определены осредненные гидродинамические характеристики потока жидкости в аппарате с двухлопастной мешалкой, сделаны выводы об эффективности перемешивания.

Ключевые слова: аппарат с мешалкой, двухлопастная мешалка, поле скорости, метод PIV

DOI: 10.31857/S004035712201002X

ВВЕДЕНИЕ

Аппараты с механическими перемешивающими устройствами широко используются во многих промышленных процессах, поэтому их стандартные применения хорошо изучены, разработаны методики расчета, масштабирования и проектирования. Однако в малотоннажных производствах, таких как фармацевтика, каталитический синтез и т.п., часто используются решения с нетрадиционной геометрией [1]. К особенностям организации внутреннего пространства таких аппаратов с перемешивающим устройством можно отнести отсутствие перегородок, нецентральное или эксцентричное расположение мешалки, малые зазоры между рабочим колесом и днищем и т.д. Литературных данных, описывающих гидродинамическую структуру потока в подобных малогабаритных аппаратах, в настоящее время очень мало, поэтому для оптимизации и повышения эффективности перемешивания требуется более детальное их исследование [2].

Самым простым и достаточно распространенным типом механических перемешивающих устройств для малогабаритных аппаратов являются лопастные мешалки. Они формируют малоинтенсивные зоны турбулентности и циркуляции и используются при перемешивании жидкостей низкой вязкости, в процессах кристаллизации, суспендирования и растворения твердых материалов.

Целью данной работы является экспериментальное изучение гидродинамической структуры потока в аппарате квадратного сечения с двухлопастной мешалкой. В качестве инструмента исследования был выбран метод цифровой трас-

серной визуализации (англоязычное название — Particle Image Velocimetry, или PIV), который за последние годы стал стандартом в области исследования полей скорости в аппаратах с перемешивающими устройствами из-за интенсивного развития техники цифровой фотографии и анализа цифровых изображений [3–5].

ПРИНЦИП МЕТОДА ЦИФРОВОЙ ТРАССЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Измерение мгновенного поля скорости методом PIV [4] основано на фиксировании перемещения частиц примеси цифровой камерой за определенный интервал времени. Размер, плотность и объемная концентрация частиц подбираются таким образом, чтобы эффекты, связанные с двухфазностью потока и плавучестью частиц, были минимальны. Измерительной областью потока считается плоскость, “вырезаемая” световым ножом. Последующая обработка изображений позволяет рассчитать смещение частиц за время между вспышками источника света и построить двухкомпонентное поле скорости в плоскости лазерного ножа; визуализировать картины линии тока; оценить соотношение между компонентами поля скоростей, форму линий тока, обнаружить циркуляционные контуры и застойные зоны [6].

Основными преимуществами указанного метода являются: невозмущающий характер измерений, возможность измерения мгновенных полей скорости, широкий диапазон измеряемых скоростей, высокая технологичность, полная автоматизация проведения процесса измерения.

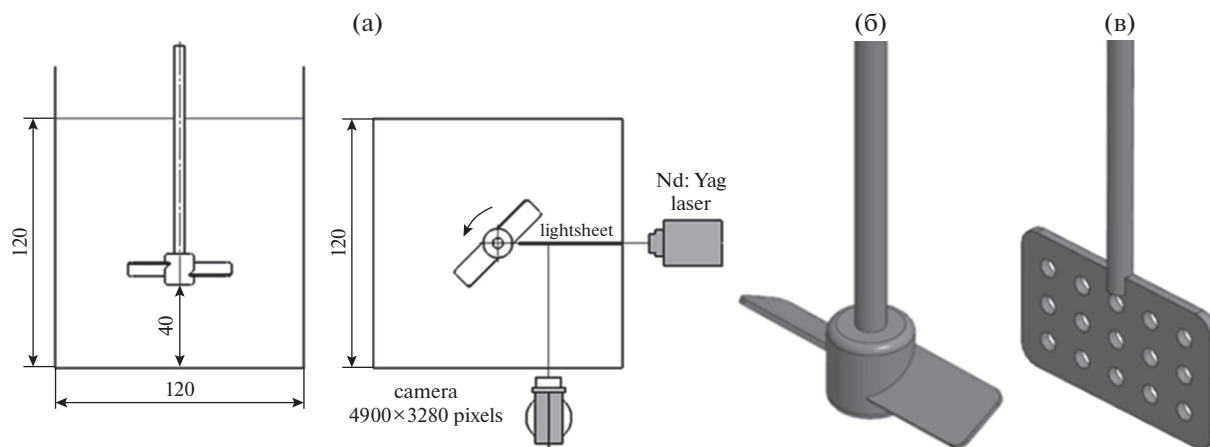


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда (а), двухлопастная мешалка с наклонными лопастями (б), двухлопастная (листовая) мешалка с перфорацией (в).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Измерения полей скорости проводились на экспериментальном стенде для исследования гидродинамической структуры потоков, который состоял из измерительной ячейки, привода с мешалкой и измерительной системы (рис. 1а).

Измерительная ячейка представляла собой прямоугольный стеклянный сосуд с длиной и шириной равной 120 мм, заполненный водой до уровня $H = 120$ мм.

В работе были использованы две конструкции лопастных мешалок:

1. Двухлопастная мешалка с наклонными лопастями, которая включала две прямоугольных лопасти шириной 12 мм и длиной 25 мм ($d_m = 50$ мм), закрепленных на валу под углом 30° – рис. 1б;
2. Двухлопастная (листовая) мешалка с перфорацией, которая представляла собой полотно шириной 50 мм ($d_m = 50$ мм) и высотой 30 мм с отверстиями диаметром 4 мм – рис. 1в.

Мешалки располагались в центре сосуда на расстоянии 40 мм ($1/3 H$) от дна и приводились во вращение с помощью привода ИКА Eurostar 20 digital.

В качестве измерительной системы использовался измерительный комплекс для диагностики многофазных потоков “Полис”, включающий в себя: двойной импульсный твердотельный Nd:YAG лазер “Quantel EverGreen”; цифровую ПЗС камеру GEV-4820 с разрешением 4900×3280 пикселей, оборудованную 50 мм макрообъективом; и синхронизирующий процессор. Цифровая камера устанавливалась на координатный механизм под углом 90° к плоскости лазерного ножа, направленного вдоль оси вала мешалки, и охватывала все поперечное сечение аппарата от оси мешалки до правой границы измерительной ячейки. В качестве трассеров были использованы полиамидные частицы диаметром 20 мкм, в количестве менее

100 мг/л, весовая плотность которых (1.03 г/см^3) достаточно близка к плотности воды.

Автоматизация процесса проведения эксперимента, хранение, обработка, а также визуализации экспериментальных и рассчитанных данных выполнялась с помощью программного комплекса Actual Flow [7]. Обработка полученных в экспериментах трассерных изображений производилась с помощью двухкадровых кросскорреляционных адаптивных алгоритмов с итеративным дроблением расчетных областей и наложением различных фильтров для улучшения качества изображений. Итоговое пространственное разрешение расчетных полей скорости составило 32×32 пикселя. Более подробное описание измерительного стенда и алгоритмов обработки данных представлено в работах [8, 9].

Эксперименты проводились при различной частоте вращения мешалки в диапазоне 50–750 об./мин ($Re^* \approx 2000\text{--}33000$). Нижняя граница диапазона была определена из условия стабильного вращения мешалки; верхняя – из условия образования воронки. Для того чтобы получать достоверные статистические данные, согласно рекомендациям [10], для каждой частоты вращения проводилось по 600 измерений случайных мгновенных полей скорости. Статистическая обработка ансамбля этих измерений позволила рассчитать осредненные гидродинамические характеристики потока жидкости в аппарате, которые были сведены в табл. 1.

Чтобы иметь возможность сравнения результатов различных экспериментов, была проведена нормировка значений скоростей и энергий относительно окружной скорости вращения мешалки $U_{tip} = \pi d n / 60$. Центробежный критерий Рейнольдса для аппаратов с перемешивающими устройствами определялся как $Re^* = \rho n d_m^2 / 60 \mu$.

Усредненные значения радиальной и осевой скорости были использованы для расчета объемного расхода, создаваемого мешалкой – Q_d [11].

Таблица 1. Гидродинамические характеристики потока жидкости в аппарате с двухлопастной мешалкой

n , об/мин	Re^*	U_{tip} , м/с	$\bar{V}/U_{tip} \times 10^2$	Q_d , м ³ /ч	K_Q	$\bar{k}/U_{tip}^2 \times 10^3$	$k_{max}/U_{tip}^2 \times 10^2$
Мешалка с наклонными лопастями							
50	2180	0.13	7.54	0.12	0.319	5.21	2.28
250	10900	0.65	6.32	0.57	0.302	5.76	2.41
500	21800	1.31	5.81	1.12	0.300	6.20	1.97
750	32700	1.96	5.26	1.57	0.279	5.23	1.75
Листовая мешалка							
50	2180	0.13	9.82	0.19	0.502	12.8	3.89
150	6530	0.40	9.82	0.57	0.503	9.15	3.84
250	10900	0.65	9.79	0.94	0.503	9.15	4.17
350	15250	0.92	9.52	1.37	0.522	14.4	4.81

Так для мешалки с наклонными лопастями Q_d рассчитывался как интеграл средней осевой скорости через поверхность, представляющую собой окружность радиусом равным радиусу мешалки:

$Q_d = \int_0^{d_m/2} 2\pi r v dr$. А для листовой мешалки, как интеграл средней радиальной скорости через боковую

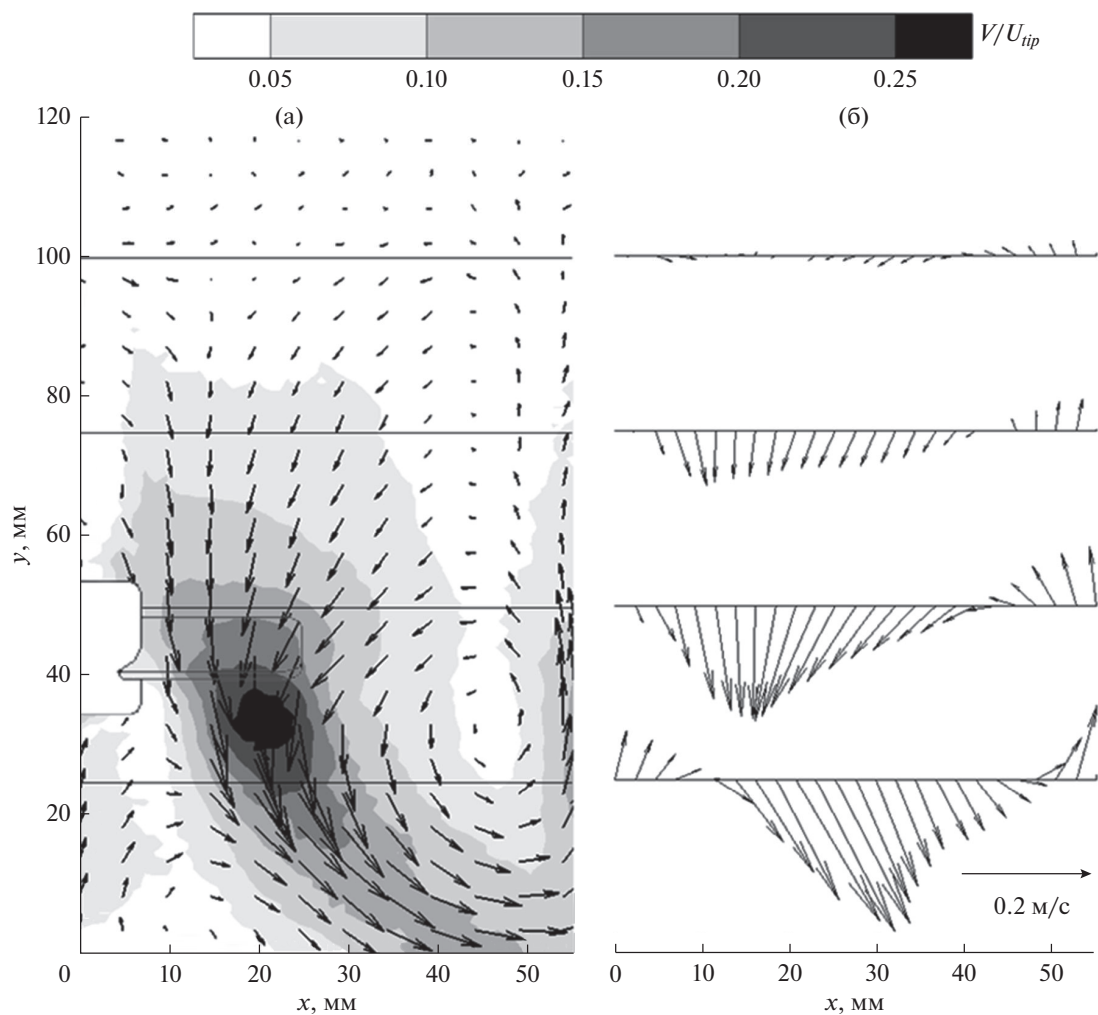


Рис. 2. Векторное поле скорости (а) и профили векторов скорости в различных сечениях по высоте аппарата с мешалкой с наклонными лопастями при $n = 500$ об./мин (б).

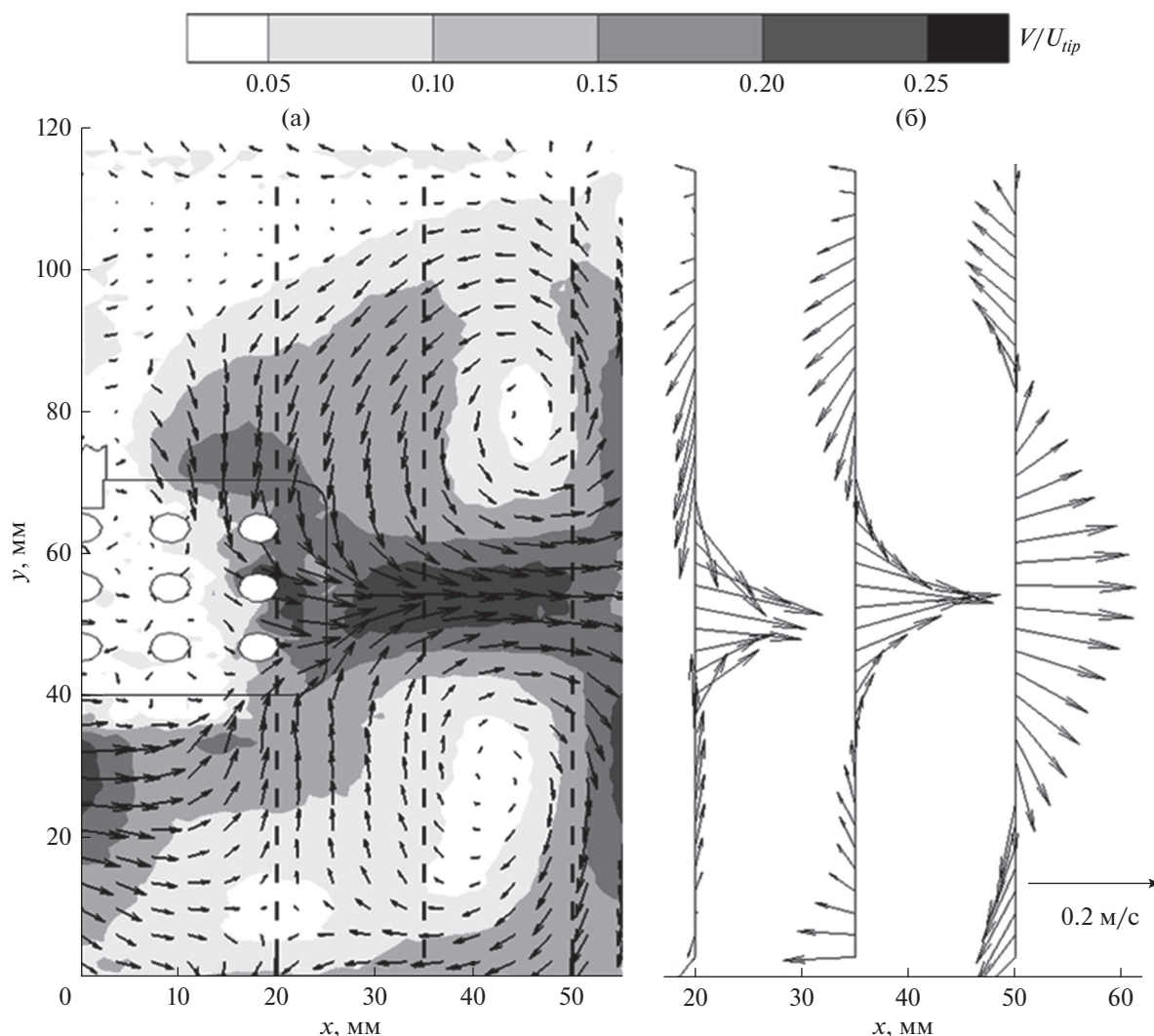


Рис. 3. Векторное поле скорости (а) и профили векторов скорости в различных сечениях по высоте аппарата с листовой мешалкой при $n = 250$ об./мин (б).

вую поверхность цилиндра радиусом равным радиусу мешалки и высотой, равной высоте лопастей

мешалки: $Q_d = \int_{-w/2}^{w/2} 2\pi(d_M/2)udy$. Соответственно коэффициент расхода рассчитывался как:

$$K_Q = \frac{Q_d}{nd_M^3} [12].$$

СТРУКТУРА ПОТОКА В АППАРАТЕ

Экспериментально полученные векторные поля скорости в рассматриваемом сечении измерительной ячейки для лопастных мешалок показаны на рис. 2а и 3а, на которых градиентом серого выделены изолинии величины нормализованного вектора скорости: $V = \sqrt{u^2 + v^2}/U_{tip}$, где u и v – компоненты вектора скорости по осям x и y .

Профили скорости на различных отметках $y = 25, 50, 75, 100$ мм и $x = 20, 35, 50$ мм изображены на рис. 2б и 3б, соответственно. Линии тока жидкости в сечении аппарата, построенные на основе векторного поля скорости в аппарате, представлены на рис. 4.

Сравнение векторных полей скорости полученных для обоих типов конструкций мешалок при различной частоте вращения показало, что структура потоков в аппарате слабо зависит от числа оборотов мешалки; меняются только значения векторов скорости и несколько смещаются координаты центров циркуляционных потоков.

Из представленных рисунков видно, что двухлопастная мешалка с наклонными лопастями создает преимущественно осевое течение, при котором в области мешалки жидкость движется практически параллельно оси вращения. Возле дна направление потока изменяется из-за влияния стенок, образуя большую замкнутую петлю циркуля-

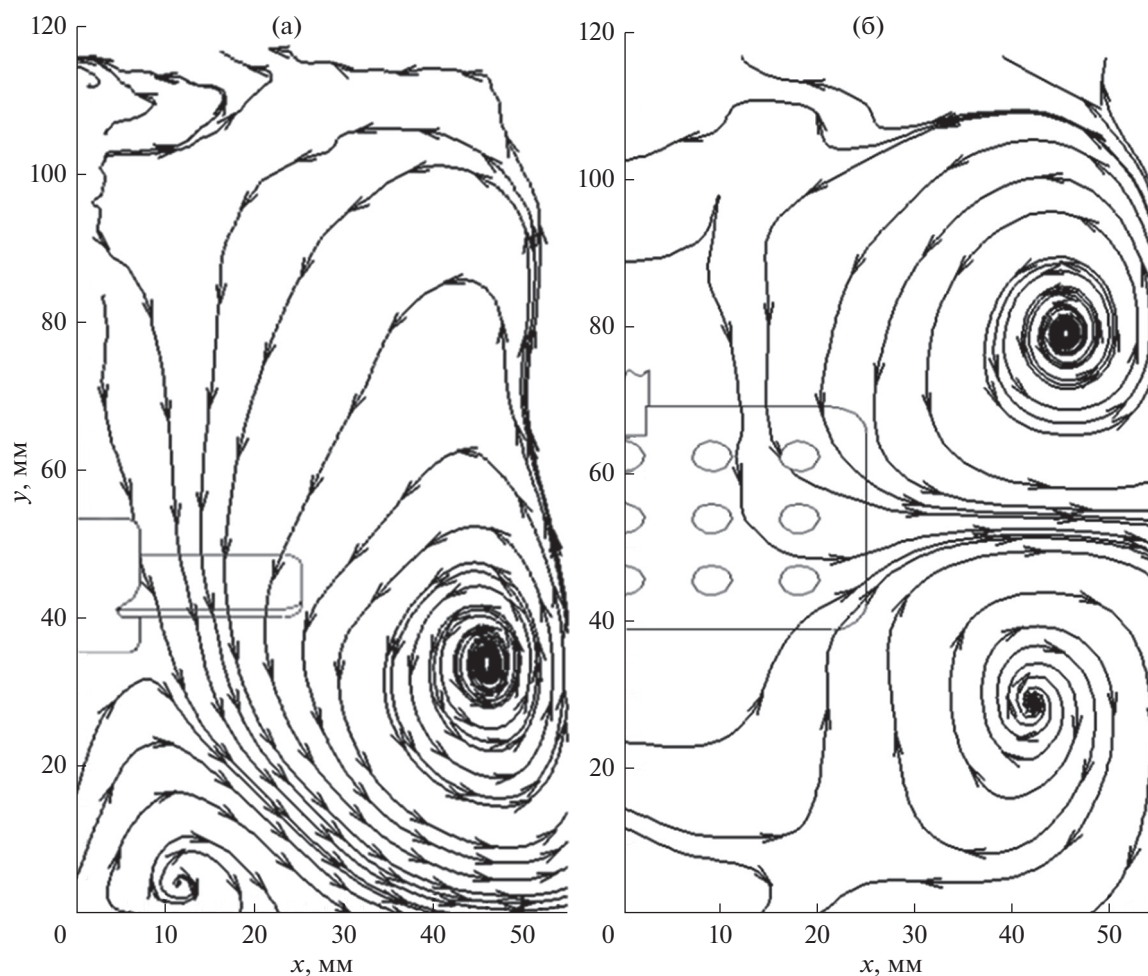


Рис. 4. Линии тока в аппарате с мешалкой с наклонными лопастями (а), с листовой мешалкой (б).

ционного потока, которая занимает собой практически все сечение. При этом в области под мешалкой формируется небольшой вторичный вихрь направленный навстречу основному потоку.

Листовая мешалка обеспечивает радиальное течение перемешиваемой среды, которое образует два характерных потока циркуляции примерно равных по интенсивности и размерам в верхней и нижней части аппарата, которые направлены на встречу друг другу. В литературных источниках отмечается, что при вращении такой мешалки на выходе из отверстий должны образовываться струи, способствующие растворению твердых материалов. Однако из полученных полей скорости (рис. 3а) видно, что интенсивность этих струй незначительна, и они не оказывают сколько-нибудь заметного влияния на структуру потока в целом по аппарату.

На рис. 2 также можно заметить, что зона наибольших значений скорости находится под лопатками мешалки, тогда как в верхнем сечении аппарата на отметках $y > 80$ мм движение жидкости практически отсутствует. Для листовой же мешалки (рис. 3), напротив областей с нуле-

выми значениями, скорости практически не наблюдается.

Из профилей скорости (рис. 2б) можно заметить, что область восходящего течения значительно уступает нисходящему потоку, как по размеру, так и по величине векторов скорости. Следовательно, значительная часть восходящего потока для мешалки с наклонными лопастями должна быть распределена по углам квадратного сечения аппарата. Профили же скорости в аппарате с листовой мешалкой (рис. 3б) позволяют предположить, что структура потока в поперечном сечении должна быть более однородна.

КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Об эффективности перемешивания можно судить по однородности распределения кинетической энергии турбулентности k , которая рассчитывается по значениям трех компонент вектора скорости следующим образом [8]:

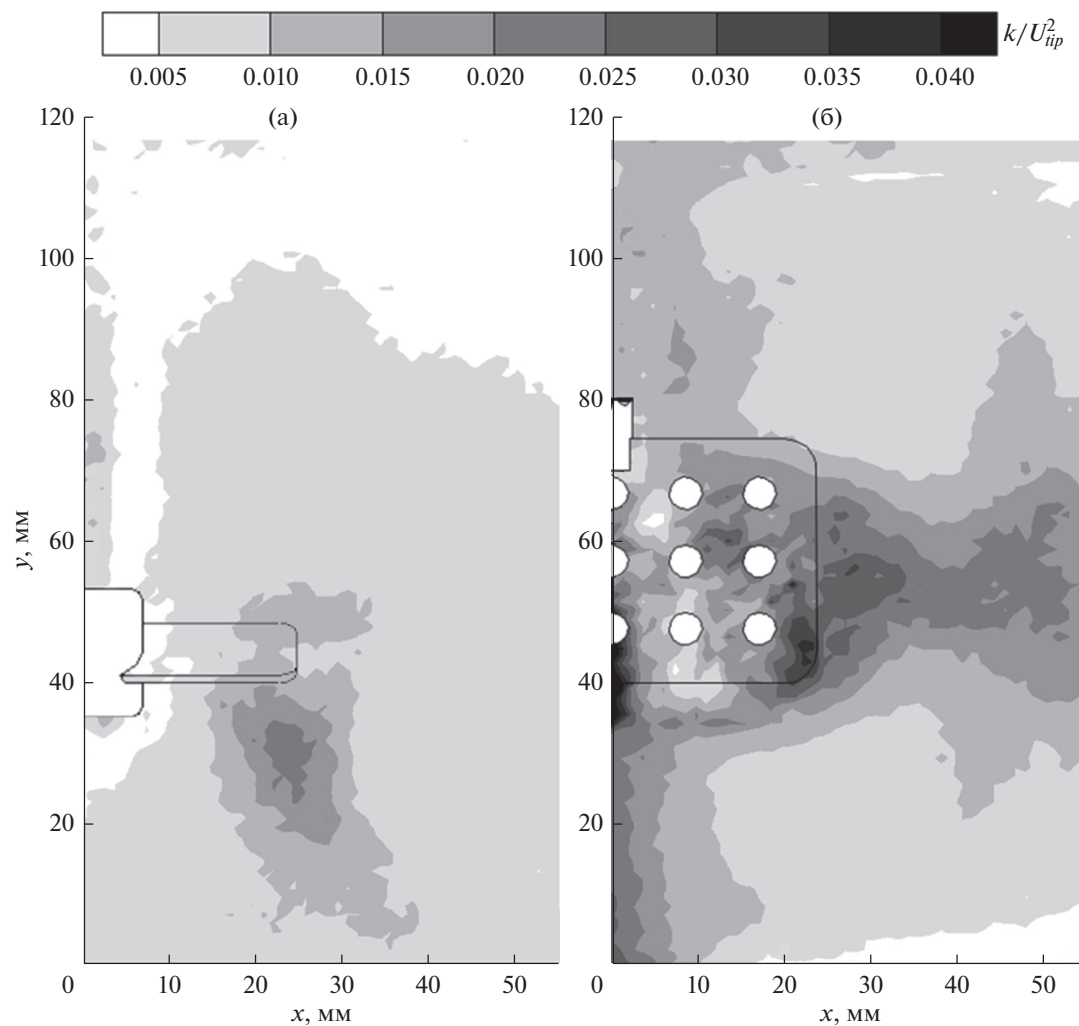


Рис. 5. Распределение нормализованной кинетической энергии турбулентности в аппарате с мешалкой с наклонными лопастями (а), с листовой мешалкой (б).

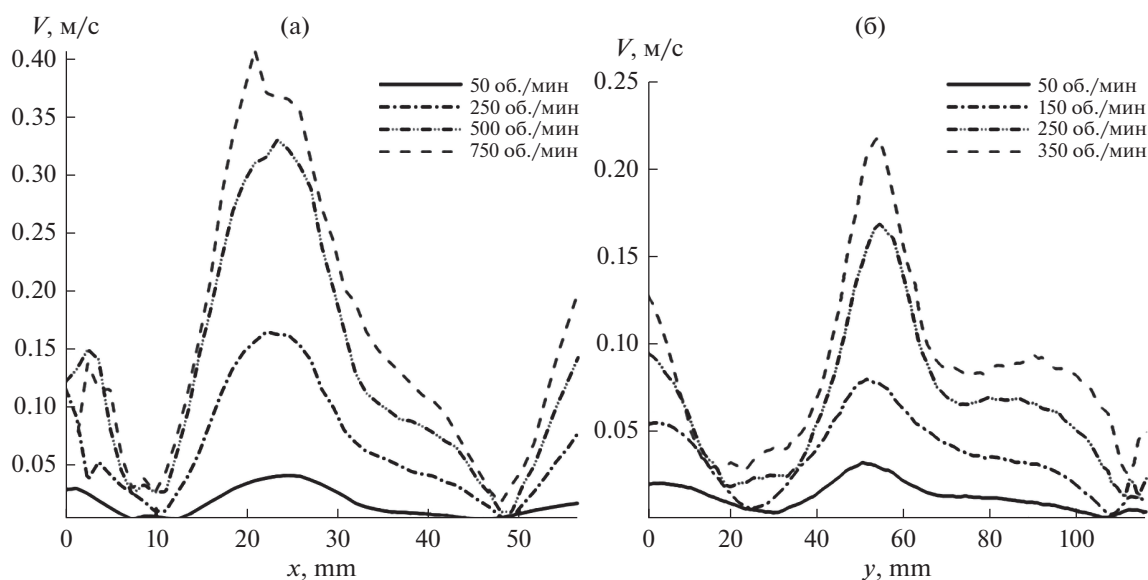


Рис. 6. Зависимость величины абсолютной скорости от числа оборотов в горизонтальном сечении под мешалкой с наклонными лопастями (а) и в вертикальном сечении рядом с листовой мешалкой (б).

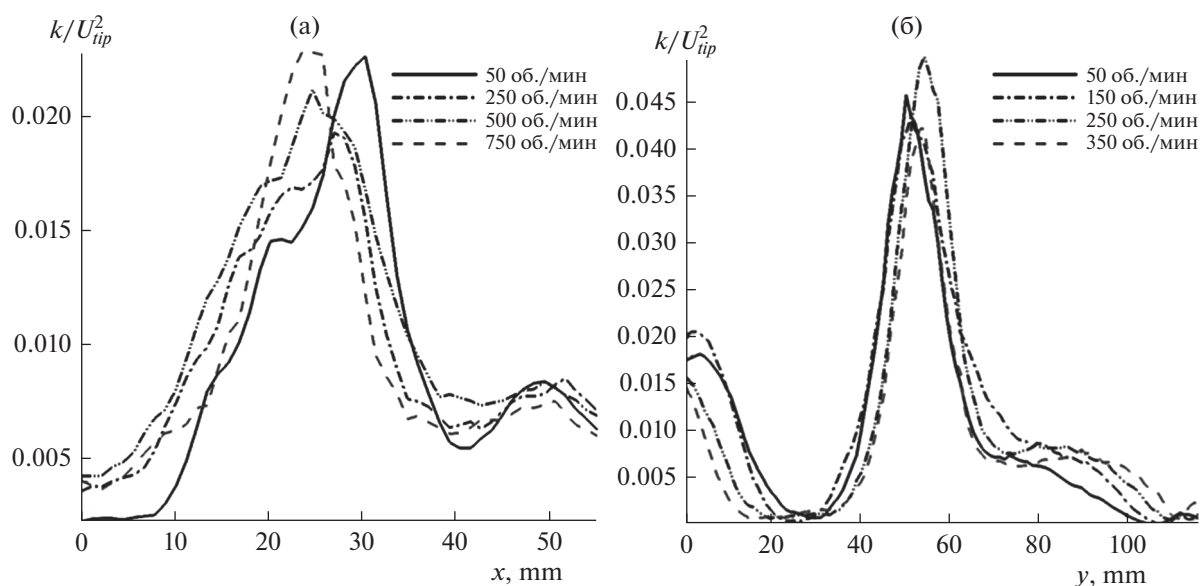


Рис. 7. Зависимость нормализованной кинетической энергии турбулентности от числа оборотов в горизонтальном сечении под мешалкой с наклонными лопастями (а) и в вертикальном сечении рядом с листовой мешалкой (б).

$$k = \frac{1}{2}(\bar{u}'^2 + \bar{v}'^2 + \bar{w}'^2).$$

В 2D PIV измерениях невозможно получить все три компоненты одновременно, поэтому компоненту скорости в направлении оси z находят исходя из предположения об изотропности потока:

$$k = \frac{1}{2}(\bar{u}'^2 + \bar{v}'^2 + \frac{1}{2}(\bar{u}'^2 + \bar{v}'^2)) = \frac{3}{4}(\bar{u}'^2 + \bar{v}'^2).$$

Рассчитанное таким образом поле кинетической энергии турбулентности представлено на рис. 5, из которого видно, что значительная энергия турбулентности для мешалки первой конструкции сосредоточена под лопастями, тогда как в остальном объеме аппарата ее значение не превышает 10% от максимального. Следовательно, мешалки данной конструкции в равных условиях будут обладать меньшей эффективностью перемешивания, и создавать малоинтенсивные локальные напряжения.

В аппарате с листовой мешалкой поле кинетической энергии турбулентности распределено более равномерно по сечению; максимальные значения сосредоточены в области самой мешалки и под ней, минимальные — ближе к центрам зон циркуляции и в верхней части аппарата. В целом среднее значение кинетической энергии (табл. 1) практически в 2 раза выше, чем для мешалки с наклонными лопастями.

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ МЕШАЛКИ

Влияние частоты вращения мешалки можно проследить по значениям гидродинамических ха-

рактеристик потока жидкости в аппарате (табл. 1), или по величине абсолютной скорости (рис. 6) и нормализованной кинетической энергии турбулентности (рис. 7).

Согласно этим данным, все рассматриваемые параметры в абсолютных значениях увеличиваются пропорционально числу оборотов мешалки, когда их нормализованные значения показывают обратную тенденцию, что может свидетельствовать об увеличении доли потерь энергии. Наиболее ярко это выражено для мешалки с наклонными лопастями, для которой в диапазоне 50–750 об./мин нормализованное значение средней скорости уменьшается в 1.5 раза. Интересным является то, что в диапазоне 250–500 об./мин как в усредненных (табл. 1), так и в местных (рис. 6) значениях наблюдается практически полное совпадение, что свидетельствует об автономной области работы. Следовательно, в заданных условиях двухлопастные мешалки с наклонными лопастями работают наиболее эффективно при низком числе оборотов мешалки.

При этом гидродинамические характеристики лопастной мешалки остаются примерно постоянными во всем исследованном диапазоне частоты вращения 50–350 об./мин и отличаются друг от друга не более чем на 5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, с помощью измерительного комплекса “Полис”, предназначенного для определения мгновенных полей скорости и диагностики многофазных потоков, бесконтактным методом цифровой трассерной визуализации PIV получены гидродинамические характеристики потока в ма-

логабаритном аппарате квадратного сечения при различном числе оборотов двухлопастной мешалки различных конструкций.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что мешалки с наклонными лопастями в равных условиях обладают меньшей эффективностью перемешивания и создают интенсивные локальные напряжения только в области под лопатками. Наибольшая эффективность перемешивания этих мешалок в аппаратах квадратного сечения достигается при малых значениях числа оборотов, а автотомельный режим работы наступает при числе оборотов мешалки в диапазоне 250–500 об./мин.

Листовые же мешалки обеспечивают более однородное поле кинетической энергии турбулентности при больших средних и максимальных значениях энергии, и в целом обладают большим значением коэффициента расхода, следовательно, более эффективны в процессах перемешивания. При этом мешалки данного типа показывают высокую стабильность гидродинамических характеристик во всем исследованном диапазоне частот вращения. Оценить влияние перфорации на эффективность перемешивания в проведенных экспериментах не представляется возможным, так как влияние струй, образующихся на выходе из отверстий, практически не заметно в общей структуре потоков в аппарате. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №18-79-10136 <https://rscf.ru/project/18-79-10136/>.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

d_m	диаметр мешалки, м
H	уровень жидкости в аппарате, м
k	кинетическая энергия турбулентности, m^2/c^2
K_Q	коэффициент расхода
n	число оборотов мешалки, об/мин
Q_d	объемный расход, создаваемый мешалкой, $m^3/ч$
Re^*	центробежный критерий Рейнольдса
r	радиус мешалки, мм
u, v, w	радиальная, осевая и тангенциальная составляющие вектора скорости, м/с
$\bar{u}', \bar{v}', \bar{w}'$	осредненные пульсационные составляющие вектора скорости, м/с
$U_{\text{тпр}}$	окружная скорость вращения мешалки, м/с
V	абсолютное значение вектора скорости, м/с
x, y	координаты, мм

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барабаш В.М., Абиев Р.Ш., Кулов Н.Н.* Обзор работ по теории и практике перемешивания // Теорет. основы хим. технологии. 2018. Т. 52. № 4. С. 367.
2. *Chung K.H.K., Simmons M.J.H., Barigou M.* Angle-Resolved Particle Image Velocimetry Measurements of Flow and Turbulence Fields in Small-Scale Stirred Vessels of Different Mixer Configurations // Ind.&Eng. Chem. Res. 2009. V. 48(2). P. 1008.
3. *Raffel M., Willert C., Wereley S., Kompenhans J.* Particle Image Velocimetry. A practical guide. Berlin: Springer, 2007.
4. *Šulc R., Dítl P.* Progress in the evaluation of local energy dissipation rate in an agitated vessel // Рос. хим. журн. 2018. Т. 6. № 4. С. 39.
5. *Шульц Р., Дитль П., Яшикова Д., Котек М., Конечный В., Кисела Б.* Минимальное время регистрации для измерений скорости по изображениям частиц (PIV-метод) в резервуаре при перемешивании зубчатой крыльчаткой с высоким усилием сдвига // Изв. Рос. акад. наук. Мех. жидкости и газа. 2020. № 2. С. 88.
6. *Баранов Д.А., Блинчев В.Н., Вязьмин В.А. и др.* Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование / Под ред. Кутепова А.М. М.: Логос, 2001.
7. *Ахметбеков Е.К., Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М., Токарев М.П., Тюрюшкин А.Н.* Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) // Вычислит. методы и програм. 2006. Т. 7. С. 79.
8. *Мухаметзянова А.Г., Алексеев К.А., Кутепов Р.Р.* Экспериментальный стенд для исследования гидродинамической структуры потоков в аппаратах с мешалкой // Вестник Казанского технол. ун-та. 2019. Т. 22. № 6. С. 51.
9. *Alekseev K.A., Mukhametzyanova A.G., D'yakonov G.S.* Experimental Investigations of Velocity Fields in Packed Bed Static Mixers // Theor. Found. of Chem. Eng. 2017. V. 51. № 3. P. 266.
10. *Chunmei P., Jian M., Xinhong L., Zhengming G.* Investigation of fluid flow in a dual Rushton impeller stirred tank using particle image velocimetry // Chinese J. Chem. Eng. 2008. V. 16(5). P. 693.
11. *Zhao J., Gao Z., Bao Y.* Particle Image Velocimetry Study of Flow Patterns and Mixing Characteristics in Multiple Impeller Stirred Tank // J. Chem. Eng. of Japan. 2011. V. 44. № 6. P. 389.
12. *Доманский И.В., Мильченко А.И., Некрасов В.А., Воробьев-Десятовский Н.В.* Производительность осевых мешалок в смесителях с отражательными перегородками // Теорет. основы хим. технологии. 2020. Т. 54. № 1. С. 97.