

УДК 533.6.02

## МИНИМАЛЬНОЕ ВРЕМЯ РЕГИСТРАЦИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТИ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ЧАСТИЦ (PIV-МЕТОД) В РЕЗЕРВУАРЕ ПРИ ПЕРЕМЕШИВАНИИ ЗУБЧАТОЙ КРЫЛЬЧАТКОЙ С ВЫСОКИМ УСИЛИЕМ СДВИГА

© 2020 г. Р. Шульц<sup>a,\*</sup>, П. Дитль<sup>a</sup>, Д. Яшикова<sup>b</sup>,  
М. Котек<sup>b</sup>, В. Копецкий<sup>b</sup>, Б. Кисела<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Чешский технический университет в Праге, Машиностроительный факультет,  
кафедра химического машиностроения, Прага, Чехия

<sup>b</sup> Либерецкий технический университет, Институт наноматериалов, передовых технологий и инноваций,  
Либерец, Чехия

<sup>c</sup> Институт гидродинамики, Чешская Академия наук, Прага, Чехия

\* E-mail: radek.sulc@fs.cvut.cz

Поступила в редакцию 16.06.2019 г.

После доработки 08.10.2019 г.

Принята к публикации 08.10.2019 г.

Поле течения в механически перемешиваемом резервуаре часто исследуется PIV-методом (методом измерения скорости по изображениям частиц или, иными словами, с помощью трассерной визуализации). В опубликованных исследованиях время между регистрациями изображений изменяется от десятых долей секунды до нескольких секунд. Возникает вопрос: какое минимальное время регистрации необходимо для получения значимых данных? Настоящее исследование имеет целью определение минимального времени регистрации, которое требуется для получения согласованных результатов для поля скоростей, при использовании трассерной визуализации в резервуаре с жидкостью, перемешиваемой зубчатой крыльчаткой с высоким усилием сдвига. Полученные результаты помогают подобрать экспериментальные условия для PIV-измерений, которые гарантируют получение правильных данных для скорости. Эксперименты выполнены в цилиндрическом резервуаре с плоским дном внутренним диаметром 400 мм при наличии внутренних радиальных перегородок (дефлекторов) по всей высоте сосуда. Резервуар заполнялся тремя различными жидкостями и перемешивался зубчатой крыльчаткой (импеллером) диаметром 133 мм. Использовалась двумерная трассерная визуализация (PIV-метод) с разрешением по времени в диапазоне чисел Рейнольдса крыльчатки от 68000 до 221000. Статистический анализ радиальной и осевой компонент средней и пульсационных скоростей, измеренных в течении, нагнетаемом крыльчаткой, показал, что значение безразмерного минимального времени регистрации не зависит от числа Рейнольдса крыльчатки. Это значение равно  $Nt_{Rmin} = 62$  для средней радиальной скорости и пульсационных скоростей как в радиальном, так и осевом направлениях, тогда как большее время измерений,  $Nt_{Rmin} = 174$ , требуется для получения согласованной средней осевой скорости при изменчивости  $\pm 2\%$ . В качестве параметра масштабирования для оценки минимального времени регистрации изображений рекомендуется безразмерное число  $Nt_{Rmin} = \text{const}$ .

**Ключевые слова:** перемешивание, зубчатая крыльчатка с высоким усилием сдвига, измерения скорости по изображениям частиц (PIV-метод), время регистрации

**DOI:** 10.31857/S0568528120020139

### ОБОЗНАЧЕНИЯ

$B$	= ширина внутренней перегородки (дефлектора)	[м]
$B_R$	= постоянная	[—]
$C$	= зазор крыльчатки (от дна до нижнего края крыльчатки)	[м]
$D$	= диаметр крыльчатки	[м]
$H$	= высота жидкости	[м]

$m$	= число экспериментальных точек	[—]
$N$	= число оборотов крыльчатки	[мин <sup>-1</sup> ]
$Nt_R$	= безразмерное время регистрации	[—]
$Nt_S$	= безразмерное время стабилизации	[—]
$r$	= радиус (радиальная координата)	[м]
$r^*$	= безразмерный радиус; $r^* = 2r/T$	[—]
$R$	= коэффициент регрессии	[—]
$Re$	= число Рейнольдса крыльчатки; $Re = ND^2/\nu$	[—]
$t$	= время	[с]
$t_i$	= время наблюдения	[с]
$t_p$	= длина временного интервала осреднения	[с]
$t_R$	= время регистрации	[с]
$t_S$	= время стабилизации	[с]
$t_{(m-2), \alpha=0.05}$	= распределение Стьюдента для числа степеней свободы $(m - 2)$ и уровня значимости $\alpha$	[—]
$T$	= диаметр резервуара	[м]
$\bar{u}_i$	среднеквадратическая пульсационная скорость в $i$ -том направлении в стационарном состоянии	[м/с]
$\bar{u}_i(t_p)$	= среднеквадратическая пульсационная скорость в $i$ -том направлении для интервала осреднения по времени $t_p$	[м/с]
$\bar{U}_i$	= средняя скорость в $i$ -том направлении в стационарном состоянии	[м/с]
$\bar{U}_i(t_p)$	= средняя скорость в $i$ -том направлении для интервала осреднения по времени $t_p$	[м/с]
vol	= допустимая изменчивость	[%]
$z$	= фактическая высота (осевая координата)	[м]
$z^*$	= безразмерная высота; $z^* = z/T$	[—]
Греческие буквы		
$\Delta t_S$	= временной интервал дискретизации	[с]
$\beta_{calc}$	= рассчитанный показатель степени	[—]
$\nu$	= кинематическая вязкость	[м <sup>2</sup> /с]
Сокращения		
ax	= осевой	
r	= радиальный	

Смесительные чаны, перемешиваемые крыльчатками (импеллерами) с высоким усилием сдвига, широко используются в химической, лакокрасочной, пищевой, фармацевтической и металлургической индустриях для диспергирования или предварительного диспергирования двух несмешивающихся жидкостей или суспензий измельченной твердой фазы в жидкости. По этой причине, смешение существенно влияет на качество продукта, его выход и экономические характеристики вышеуказанных процессов. Недостаточное или избыточное смешение может привести к потерям во времени обработки и/или образованию побочных продуктов [1–3].

Для качественного проектирования этих аппаратов и, конечно, для моделирования вышеупомянутых процессов существенно знать поле скоростей и такие характеристики турбулентности, как ее интенсивность, кинетическая энергия турбулентности и скорость диссипации турбулентной энергии. Средняя и турбулентная скорости могут быть найдены с помощью PIV-метода (измерение скорости по изображению частиц или трассерная визуализация). Чтобы получить значимые данные, время между регистрациями изображений должно превышать некоторое минимальное значение. Однако отсутствует достаточная информация о минимальных временах регистрации для разных крыльчаток (импеллеров) и различных геометрий резервуаров и импеллеров (мешалок). В опубликованных исследованиях с использованием трассерной визуализации время регистрации изменялось от десятых долей секунды до нескольких секунд. Поэтому измеренные скорости и соответственно параметры, выведенные из них, являются неточными.

В [4] была проанализирована регистрация во времени радиальных средней и пульсационных скоростей, измеренных в течении, нагнетаемом турбинной мешалкой Раштона, в цилиндрическом плоскодонном резервуаре с внутренним диаметром 300 мм при наличии (частичных) ради-

альных перегородок (дефлекторов) по всей высоте сосуда на внутренней стороне стенки. Резервуар был заполнен водой, перемешиваемой крыльчаткой (импеллером) на скорости 300 об./мин. Это исследование показало, что время регистрации оказывает значительное влияние на релевантность и точность измеренных скоростей.

Авторами недавно были опубликованы две статьи, имеющие дело с этой задачей. В обеих статьях используется турбинная мешалка Раштона и также содержатся подробности об экспериментальных, теоретических и статистических методах и используемых процедурах расчета. Первая из этих статей [5] содержит сведения о минимальном времени регистрации, которое требуется для измерения скорости ниже крыльчатки, тогда как во второй [6] представлено минимальное время регистрации для зоны на выходе из турбинной мешалки. В первой работе [5] проанализированы радиальная и осевая компоненты средней и пульсационной скоростей в течении, направленном вверх, к крыльчатке, для того чтобы определить минимальное время регистрации изображений для PIV-измерений, которое обеспечило бы значимые результаты для поля скоростей в резервуаре, перемешиваемом турбинной мешалкой Раштона. Эксперименты были выполнены на трех перемешиваемых жидкостях с различной вязкостью в диапазоне чисел Рейнольдса для крыльчатки от 50000 до 189000. Найдено, что безразмерное минимальное время регистрации, определенное как произведение скорости вращения крыльчатки (числа оборотов) и минимального времени регистрации, не зависит от числа Рейнольдса для крыльчатки и равно  $Nt_{Rmin} = 103$  при изменчивости  $\pm 2\%$ .

Для зубчатой крыльчаток (импеллеров) нами была найдена только следующая информация об условиях экспериментов, которая не показывает, было ли время регистрации достаточно большим. В [7] поле течения в выходящем потоке, созданном пилообразной крыльчаткой Екато Миксер при скорости вращения крыльчатки 1500 об./мин, было исследовано с использованием стереоскопических и высокоскоростных PIV-методов. Низкоскоростной стереоскопический PIV-метод был использован для получения трехмерного поля течения. Рабочая частота кадров составляла 15 Гц (15 векторных полей в секунду), т.е. временной интервал дискретизации  $\Delta t_s$  был равен 66.7 мс. В этом случае 500 пар изображений были зарегистрированы каждой фотокамерой в каждом эксперименте. Таким образом, время регистрации составляло 6.7 с. Двумерное поле течения было исследовано высокоскоростной PIV-системой с разрешением по времени. Рабочая частота кадров составляла 5 кГц (5000 векторных полей в секунду), т.е. временной интервал дискретизации  $\Delta t_s$  был равен 0.2 мс. В этом случае 1000 пар изображений были зарегистрированы в каждом эксперименте; таким образом, время регистрации составляло 0.2 с. Возникает вопрос: является ли это время регистрации достаточно большим для получения правильных данных?

Цели настоящей работы следующие: 1) определить минимальное время регистрации для измерений методом трассерной визуализации в резервуаре, перемешиваемом зубчатой крыльчаткой с высоким усилием сдвига; 2) определить влияние допустимой изменчивости скорости на минимальное время регистрации; 3) дать рекомендации по правилу масштабирования для оценки минимального времени регистрации.

Поскольку экспериментальные и теоретические аспекты настоящего исследования были описаны в нашей предыдущей публикации, данное короткое сообщение ограничивается изложением результатов. Внимание концентрируется на исследовании поля течения в рабочей зоне импеллера с высоким усилием сдвига, т.е. на поле течения в выходящем потоке импеллера.

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Вязкими и гравитационными силами можно пренебречь при рассмотрении сильно турбулизованного течения ньютоновской жидкости в резервуаре с дефлекторами и, в конечном итоге, безразмерные компоненты скорости, осредненной по времени, не зависят от чисел Рейнольдса и Фруда, а зависят только от места расположения.

### 1.1. Средняя и пульсационная скорости

Набор данных о мгновенной скорости  $U_i(t_j)$  в  $i$ -том направлении при  $j = 1, 2, \dots, N_R$  при времени наблюдения  $t_j$  с эквидистантным шагом по времени  $\Delta t_E$  (т.е.  $\Delta t_E = t_{j+1} - t_j$ ) был получен в заданном месте с использованием PIV-метода. Используя полученный набор данных  $U_i(t_j)$  в  $i$ -том направлении, были вычислены средняя скорость  $\bar{U}_i(t_p)$ , усредненная по времени, и среднеквадратичная пульсационная скорость  $\bar{u}_i(t_p)$  в заданном направлении при интервале усреднения различной длины  $t_p$ .

Для некоторого интервала усреднения с временной длиной  $t_p$  средняя скорость  $\bar{U}_i(t_p)$ , усредненная по времени, была определена как среднее значение элементов данных для скорости  $U_i(t_j)$  на интервале усреднения с временной длиной  $t_p$ :

$$\bar{U}_i(t_p) = \frac{1}{N_p} \times \sum_j U_i(t_j) \quad \text{при } j = 1, 2, \dots, N_p, \quad (1.1)$$

где  $\bar{U}_i(t_p)$  – средняя скорость в  $i$ -том направлении для интервала усреднения  $t_p$ ,  $U_i(t_j)$  – мгновенная скорость в  $i$ -том направлении в момент наблюдения  $t_j$ , и  $N_p$  – число элементов данных в наборе данных для скорости для интервала усреднения с временной длиной  $t_p$ .

Следовательно, пульсационная скорость в  $i$ -том направлении  $u_i(t_j)$  в момент наблюдения  $t_j$  для интервала усреднения с временной длиной  $t_p$  может быть получена как разложение мгновенной скорости:

$$u_i(t_j) = U_i(t_j) - \bar{U}_i(t_p) \quad \text{при } j = 1, 2, \dots, N_p, \quad (1.2)$$

где  $u_i(t_j)$  – пульсационная скорость в  $i$ -том направлении в момент наблюдения  $t_j$ ,  $\bar{U}_i(t_p)$  – средняя скорость в  $i$ -том направлении для интервала усреднения  $t_p$  и  $U_i(t_j)$  – мгновенная скорость в  $i$ -том направлении в момент наблюдения  $t_j$ .

Среднеквадратичная пульсационная скорость для интервала усреднения с временной длиной  $t_p$  может быть определена следующим образом:

$$\bar{u}_i(t_p) = \left( \frac{1}{N_p} \times \sum_j u_i^2(t_j) \right)^{1/2} \quad \text{при } j = 1, 2, \dots, N_p, \quad (1.3)$$

где  $\bar{u}_i(t_p)$  – среднеквадратичная пульсационная скорость в  $i$ -том направлении для интервала усреднения  $t_p$  и  $u_i(t_j)$  – пульсационная скорость в момент наблюдения  $t_j$  для временного интервала  $t_p$ .

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Детали описания PIV-установки для трассерной визуализации и процедуры измерения изложены в предыдущих исследованиях [5, 6, 8]. Вкратце, для измерений поля течения использовалась система трассерной визуализации Litron LDY 302 2D с разрешением по времени (Dantec Dynamics, Дания), работающая на частоте 1 кГц. Эксперименты выполнены в цилиндрическом резервуаре с плоским дном с внутренним диаметром 400 мм. Чан был оборудован четырьмя радиальными перегородками (дефлекторами) на боковой стенке с безразмерной шириной  $V/T = 1/10$ . Безразмерная высота жидкости  $H/T$  равнялась единице. Чан перемешивался зубчатой крыльчаткой с высоким усилием сдвига (CVS 691038.1), безразмерный диаметр крыльчатки  $D/T$  равен  $1/3$ . Безразмерный зазор крыльчатки  $C/D$ , отсчитываемый от ее нижней кромки до дна чана, равнялся  $0.75$ . Для предотвращения увлечения воздуха на поверхности жидкости находилась крышка. В качестве перемешиваемых жидкостей использовались три жидкости с разными вязкостями: (i) дистиллированная вода ( $\nu = 9.35 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ), (ii) 28% (по объему) водный раствор гликоля ( $\nu = 2 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ), и (iii) 43% (по объему) водный раствор гликоля ( $\nu = 3 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ). Поля скоростей измерялись при скорости вращения крыльчатки в диапазоне от 300 до 700 об./мин. Эксперименты выполнены в режиме течения с полностью развитой турбулентностью (число Рейнольдса  $Re$  в пределах от 68000 до 221000). В каждом эксперименте были сделаны 24000 пар фотографий. Таким образом, общее время регистрации составляло 24 с для каждого эксперимента. Рабочие условия экспериментов приведены в табл. 1.

Исследованная область была расположена в потоке, нагнетаемом крыльчаткой, что, согласно классификации, данной в [9], соответствует области О. Положение левой нижней вершины  $P[r_p, z_p]$  было [106; 105], т.е. безразмерный радиус равен  $2r/T = 0.53$  и безразмерная высота  $z/T = 0.2625$ , так что левый нижний край расположен на 8 мм ниже оси диска крыльчатки и в 106 мм от оси крыльчатки. Исследованная область имела размеры  $25.6 \times 16$  мм, при этом в экспериментах поддерживалось пространственное разрешение измерения скорости по изображениям частиц  $\Delta = 0.64$  мм. Схематическое изображение экспериментальной установки и исследованной области изображены на рис. 1.

В настоящем исследовании представлены выбранные данные, полученные в потоке, нагнетаемом крыльчаткой, в двух положениях P1 и P2, которые соответствовали безразмерным радиусам  $2r/T = 0.442$  и  $0.512$  и безразмерной высоте  $z/T = 0.2825$ , соответствующей оси диска.

**Таблица 1.** Рабочие параметры экспериментов

№ эксперимента	Жидкость	$N$ , об./мин	$v$ , м <sup>2</sup> /с	Re [–]	Время регистрации $t_R$ , с
w-N300	Вода	300	$9.35 \times 10^{-7}$	94641	24
w-N500	Вода	500	$9.35 \times 10^{-7}$	157735	24
w-N700	Вода	700	$9.35 \times 10^{-7}$	220829	24
g28-N700	28% гликоль	700	$2 \times 10^{-6}$	103186	24
g43-N700	43% гликоль	700	$3 \times 10^{-6}$	68791	24

### 3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Динамика средней и пульсационных скоростей в радиальном и осевом направлениях была рассчитана для интервалов усреднения с различной временной длиной в каждом проведенном эксперименте. На рис. 2 изображены типичные зависимости компонент скоростей от времени усреднения.

Исследованная зона содержит преимущественно радиальное течение от крыльчатки, поэтому наблюдаемые осевые средние скорости близки к нулю. В полном согласии с [9] эти свойства течения соответствуют характеристикам рассматриваемой зоны. Данные, изображенные на рис. 2, показывают, что имеется некоторое увеличение временной длины интервала усреднения, на которой рассчитывается скорость, усредненная по времени, эта скорость испытывает пульсации до тех пор, пока не будет достигнута некоторая стационарная скорость.

Таким образом, минимальное время регистрации должно быть тем же самым или больше, чем время, нужное для установления стационарной скорости. При определении стабилизации похожий подход был принят в [5], как и тот, что был использован в [10] для определения времени смешения. В принципе, время стабилизации определяется как время, в течение которого изменчивость скорости, усредненной по времени, меньше, чем некоторая заданная доля (процент) стационарного значения.

Для того, чтобы проверить влияние диапазона допустимой изменчивости на необходимое время стабилизации, времена стабилизации определялись для следующих четырех выбранных долей (процентов) стационарного значения:  $\pm 1\%$ ,  $\pm 2\%$ ,  $\pm 3\%$  и  $\pm 4\%$ .

В табл. 2 представлены расчетные стационарные значения средней и пульсационной компонент безразмерных радиальной и осевой скоростей в положении P1. На основе проведенного анализа найдено, что безразмерные стационарные скорости, отнесенные к произведению числа оборотов крыльчатки  $N$  на ее диаметр  $D$ , не зависят от числа Рейнольдса крыльчатки в соответствии с проверкой гипотезы для каждой из скоростей отдельно [11]. Результаты проверки гипотез представлены в табл. 2, включая вычисленные значения  $|t|$ . Для пяти значений числа Рейнольдса крыльчатки и уровня значимости  $\alpha = 0.05$  коэффициент распределения Стьюдента  $t_{(m-2),\alpha}$  равен 3.1825.

Найдено, что в положении P1 безразмерная средняя радиальная скорость равнялась приблизительно  $1.1493 \pm 5\%$ . В отличие от этого, как и ожидалось для этой области, безразмерная осевая средняя скорость является более изменчивой и близкой к нулю. Найдено, что безразмерная осевая средняя скорость равнялась приблизительно  $0.0549 \pm 37\%$ , т.е. была приблизительно в 21 раз меньше, чем безразмерная радиальная средняя скорость. Найдено, что компоненты пульсационной скорости имели близкие значения, так что безразмерная осевая среднеквадратичная пульсационная скорость равнялась  $0.4797 \pm 4\%$ , а безразмерная радиальная пульсационная скорость равнялась приблизительно  $0.4845 \pm 10\%$ . Найдено также, что радиальная скорость составляла 42% средней радиальной скорости.

Как и ожидалось, в положении P2, находящемся на большем расстоянии от края крыльчатки, радиальная средняя скорость меньше ( $\approx 0.8581 \pm 8\%$ ), чем в положении P1. Компоненты пульсационной скорости также убывали, но не так сильно, как радиальная средняя скорость. Безразмерная осевая средняя скорость была приблизительно в 15 раз меньше, чем безразмерная радиальная средняя скорость. Было найдено, что радиальная среднеквадратичная пульсационная скорость составляет 51% радиальной средней скорости, а осевая среднеквадратичная скорость составляет 90% радиальной компоненты.

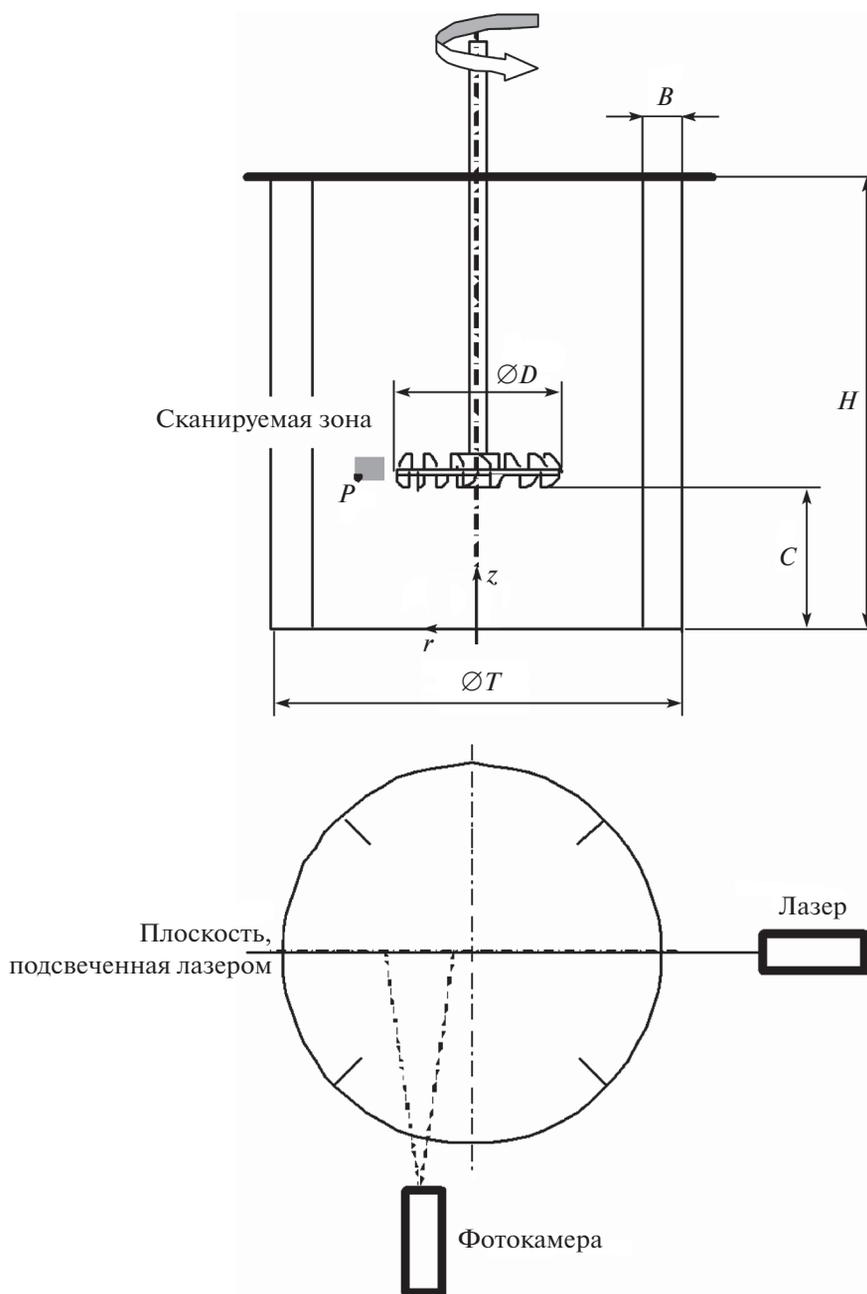
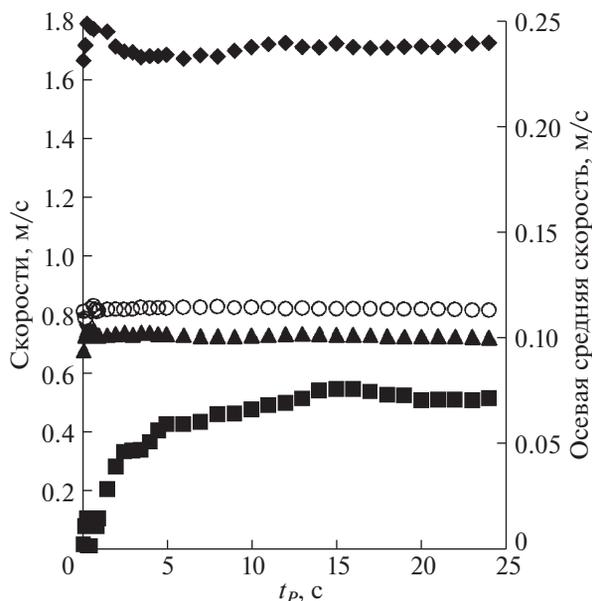


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки и исследуемой зоны.

Безразмерное время стабилизации (значение  $Nt_S$ ), определенное как произведение времени стабилизации и числа оборотов крыльчатки, находилось в каждом эксперименте для каждой составляющей скорости (т.е. отдельно для средних и пульсационных скоростей в радиальном и осевом направлениях) и отдельно в каждом диапазоне изменчивости. Таким образом, так определяемое безразмерное время соответствует общему числу оборотов крыльчатки за некоторое заданное время. В табл. 3 представлены значения  $Nt_S$ , найденные при допустимой изменчивости  $\pm 2\%$  в положении P1.

Найдено, что значения  $Nt_S$  статистически независимы от числа Рейнольдса крыльчатки для каждой скорости. Найдено также, что значения  $Nt_S$ , вычисленные для положения P2 на большем расстоянии от крыльчатки, близки к значениям, полученным около крыльчатки в положении P1.



**Рис. 2.** Скорости как функции длины временного интервала усреднения – w-N700 ( $Re = 220\,829$ ); (◆) радиальная средняя скорость, (■) осевая средняя скорость, (○) радиальная пульсационная скорость, (▲) осевая пульсационная скорость.

Тем не менее табл. 3 показывает, что безразмерное время стабилизации для средней осевой скорости существенно больше. Другими словами, в этой зоне получение адекватного значения стационарной средней осевой скорости требует большего времени измерения. По этой причине было решено учитывать эту разницу и задавать безразмерное время стабилизации  $Nt_S = 174$  для средней осевой скорости и  $Nt_S = 62$  для средней радиальной скорости и компонент пульсационной скорости в радиальном и осевом направлениях. Значение, равное 62, было выбрано как максимальное значение  $Nt_S$  для вышеупомянутых скоростей. Другими словами, это означает, что минимальное время регистрации должно по крайней мере покрывать 62 оборота крыльчатки, чтобы получить стационарные результаты для средней радиальной скорости и компонент пульсационной скорости как в радиальном, так и осевом направлениях, и по крайней мере 174 обо-

**Таблица 2.** Стационарные значения скорости для положения P1 – влияние числа Рейнольдса крыльчатки

	$\bar{U}_r/(ND)$ [–]	$\bar{U}_{ax}/(ND)$ [–]	$\bar{u}_r/(ND)$ [–]	$\bar{u}_{ax}/(ND)$ [–]
<i>Данные экспериментов</i>				
w-N300	1.1657	0.0396	0.5040	0.4620
w-N500	1.1349	0.0528	0.5044	0.4761
w-N700	1.1112	0.0457	0.5254	0.4660
g28-N700	1.1100	0.0819	0.4523	0.4976
g43-N700	1.2245	0.0548	0.4366	0.4970
<i>Проверка гипотезы</i>				
Соотношение: $\beta_{calc}$ [–]	–0.069	–0.127	0.143	–0.043
$t$ -характеристики $ t $	2.1	0.4	2.5	1.2
Гипотеза:	допустимая	допустимая	допустимая	допустимая
<i>Среднее значение</i>	1.1493	0.0549	0.4845	0.4797
	$\pm 0.0593$	$\pm 0.0201$	$\pm 0.0472$	$\pm 0.0209$

Примечание: Проверяемая гипотеза: безразмерная скорость =  $B_R(Re)^{\beta_{calc}}$ , проверенная гипотеза: безразмерная скорость =  $B_H(Re)^0$ .

**Таблица 3.** Безразмерное время стабилизации  $Nt_S$  для положения P1 и изменчивости  $\pm 2\%$  – влияние числа Рейнольдса

$Nt_S$	$\bar{U}_r/(ND)$ [–]	$\bar{U}_{ax}/(ND)$ [–]	$\bar{u}_r/(ND)$ [–]	$\bar{u}_{ax}/(ND)$ [–]	Все данные
<i>Вычисленное время <math>Nt_S</math></i>					
w-N300	30	115	55	35	X
w-N500	100	188	33	25	X
w-N700	105	228	12	53	X
G28-N700	29	128	35	93	X
G43-N700	47	210	47	82	X
<i>Проверка гипотезы</i>					
Соотношение: $\beta_{calc}$ [–]	1.063	0.265	–1.146	–0.528	–0.086
$t$ -характеристики $ t $	2.1	0.8	3	0.8	0.19
Гипотеза:	допустимая	допустимая	допустимая	допустимая	допустимая
<i>Average value</i>	62	174	36	58	82

Примечание: Проверяемая гипотеза:  $Nt_S = B_R(\text{Re})^{\beta_{calc}}$ , проверенная гипотеза:  $Nt_S = B_H(\text{Re})^0$ .

**Таблица 4.** Сравнение соотношения  $Nt_S = C$  для зубчатой крыльчатки и турбинной мешалки Раштона при изменчивости  $\pm 2\%$ 

Тип импеллера	Зона	C		Ссылки
		Безразмерная радиальная средняя/пульсационная скорость	Безразмерная осевая средняя/пульсационная скорость	
Зубчатая крыльчатка	Зона нагнетания крыльчатки	62/36	174/58	Данная публикация [6]
Турбина Раштона	Зона нагнетания крыльчатки	79/32	126/83	
Турбина Раштона	Ниже турбинной лопатки	111/114	87/100	[5]

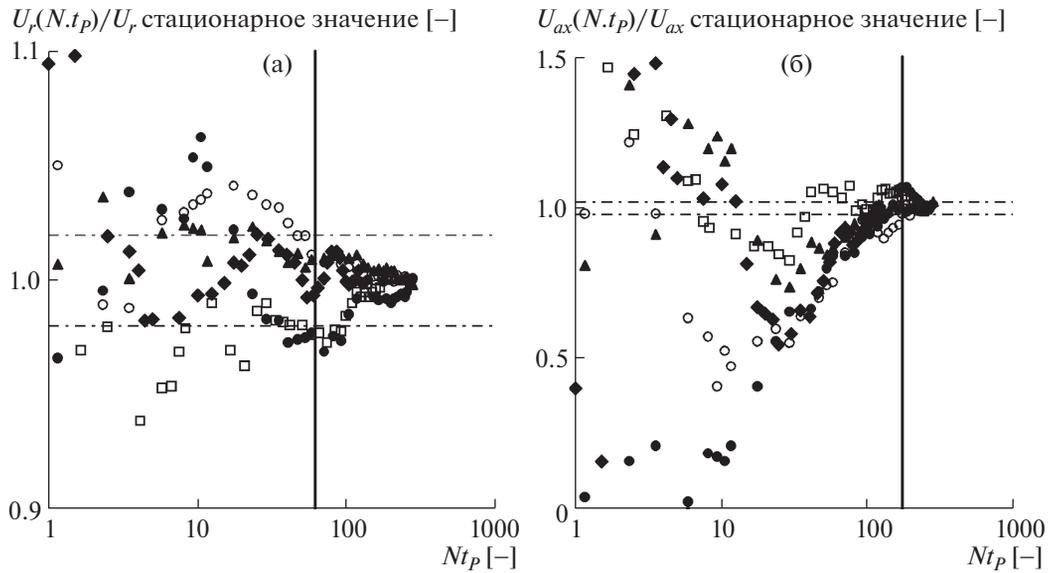
рота крыльчатки необходимы для получения согласованных результатов для средней осевой скорости. Этот эффект времени измерения может быть выразительно продемонстрирован при положении на графике полученных данных как отношение рассчитанной скорости, усредненной по времени, и стационарной скорости в зависимости от длины временного интервала усреднения. Зависимости этого отношения от безразмерной длины временного интервала усреднения изображены на рис. 3 и 4 для средней и пульсационной скоростей в положении P1. Разброс скоростей показывает недостаточность времени регистрации для времени меньше минимального, задаваемого значением  $Nt_S$ .

Используя ту же процедуру, значения  $Nt_S$  были определены для изменчивостей  $\pm 1\%$ ,  $\pm 3\%$  и  $\pm 4\%$ . Эффект допустимой изменчивости скорости графически представлен на рис. 5. Найдено, что значение  $Nt_S$  растет экспоненциально с ростом изменчивости. Значения  $Nt_S$  были также определены для положения P2, для того чтобы протестировать влияние расстояния от края крыльчатки. Полученные значения изображены на рис. 5 пустыми (не черными) символами. Как следует из рис. 5, значения  $Nt_S$ , вычисленные в положении P2, близки к значениям, полученным вблизи крыльчатки, т.е. в этой области расстояние от крыльчатки не играет никакой роли. Таким образом, влияние допустимой изменчивости на минимальное время регистрации для обоих положений может быть описано следующими соотношениями для средней осевой скорости и других скоростей, соответственно

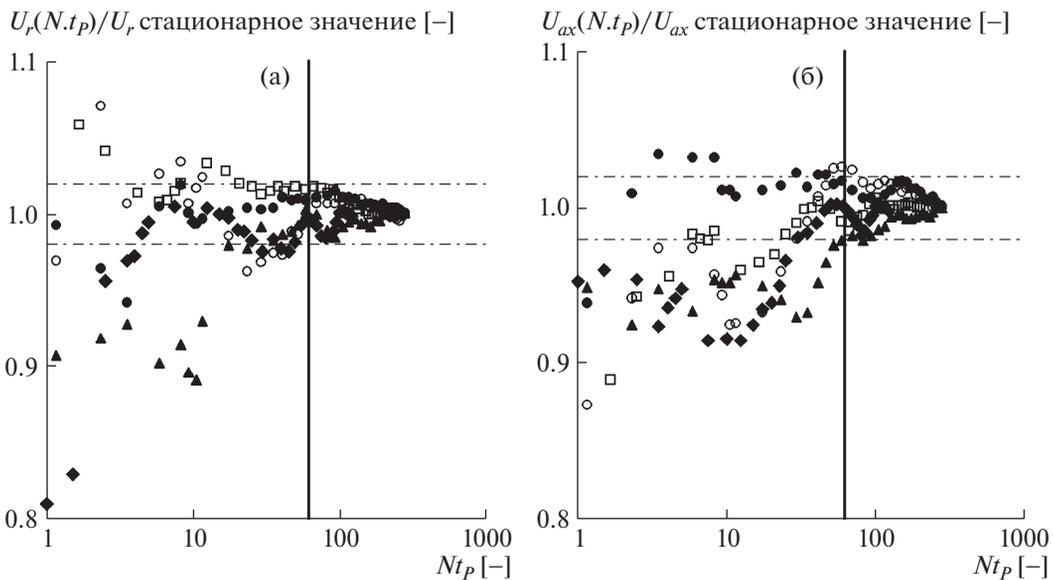
$$Nt_S = 185 \times \text{vol}^{-0.11}, \quad R = 0.923, \quad (3.1)$$

$$Nt_S = 129 \times \text{vol}^{-1.18}, \quad R = 0.968. \quad (3.2)$$

В табл. 4 сравниваются минимальное время регистрации для измерений скорости методом трассерной визуализации для зубчатой крыльчатки, полученное в настоящей работе, и ранее

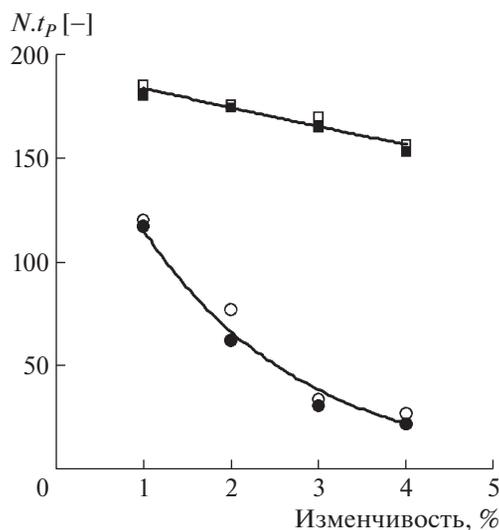


**Рис. 3.** Средние скорости как функции безразмерной длины временного интервала усреднения при изменчивости  $\pm 2\%$  в положении P1; а) Радиальная средняя скорость, (—)  $Nt_S = 62$ , б) Осевая средняя скорость (—)  $Nt_S = 174$ ; (◆) w-N300, (□) w-N500, (●) w-N700, (▲) g28-N700, (○) g43-N700, (---) предел изменчивости.



**Рис. 4.** Пульсационные скорости как функции безразмерной длины временного интервала усреднения при изменчивости  $\pm 2\%$  в положении P1; а) Радиальная пульсационная скорость, (—)  $Nt_S = 62$ , б) Осевая пульсационная скорость (—)  $Nt_S = 62$ ; (◆) w-N300, (□) w-N500, (●) w-N700, (▲) g28-N700, (○) g43-N700, (---) предел изменчивости.

опубликованные значения  $Nt_S$ , определенные для полей скорости в двух зонах резервуара, перемешиваемого турбинной мешалкой Раштона, а именно, в зоне нагнетания турбины и в зоне ниже лопаток турбины [5, 6]. В зоне нагнетания турбины получение стационарного значения для средней осевой скорости требует большего времени измерения, чем для других компонент скорости, как для зубчатой крыльчатки, так и для турбинной мешалки Раштона. В отличие от этих измерений, время, необходимое для получения значимых данных ниже турбинной мешалки Раштона, было практически одинаковым для всех компонент скорости. Другими словами, получение верных значений скорости в различных областях резервуара, перемешиваемого импелерами различного типа, может потребовать разных времен измерения.



**Рис. 5.** Безразмерное время стабилизации  $Nt_S$  – эффект допустимой изменчивости; (■) осевая средняя скорость в положении P1, (□) осевая средняя скорость в положении P2, (●) другие скорости в положении P1, (○) другие скорости в положении P2.

В заключение можно ответить на вопрос, поставленный в начале этого исследования. Согласно полученным результатам, время регистрации, использованное в [7] для измерений поля течения высокоскоростной PIV системой трассерной визуализации с разрешением по времени, оказывается недостаточным для получения стационарного поля скорости. Время регистрации должно быть более 7 с для средней осевой скорости и более 2.5 с для других скоростей при изменчивости  $\pm 2\%$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рекомендации для правильных измерений скорости жидкости с использованием PIV-метода в зоне, куда жидкость нагнетается крыльчаткой, с учетом времени регистрации данных в резервуаре с жидкостью, перемешиваемой зубчатой крыльчаткой, могут быть подытожены следующим образом:

- Средняя осевая скорость, которая близка к нулю в исследованной зоне, требует большего времени измерения. Безразмерное время регистрации изображений, определенное как произведение числа оборотов крыльчатки и минимального времени регистрации  $Nt_{Rmin}$ , равно 174 при допустимой изменчивости  $\pm 2\%$ . Для других компонент скорости время измерений может быть меньше. Безразмерное время  $Nt_{Rmin}$  равно 62 при допустимой изменчивости  $\pm 2\%$ .

- Если требуется меньший интервал изменчивости для какой-либо стационарной величины, минимальное время регистрации должно быть увеличено. Найдено, что значение  $Nt_S$  растет экспоненциально при уменьшении допустимой изменчивости и расстояние до крыльчатки в исследованной зоне влияет незначительно на это безразмерное минимальное время регистрации изображений. Было найдено, что значения  $Nt_S$ , вычисленные в положении P2 на большем расстоянии от крыльчатки, ближе к значениям, полученным вблизи крыльчатки в положении P1.

- Согласно вышеописанной процедуре, минимальное время регистрации может быть также определено для других типов крыльчаток и зон, в которых гидродинамика и поле течения могут быть измерены с использованием PIV-метода.

- Безразмерный критерий масштабирования  $Nt_{Rmin} = \text{const}$  позволяет определить минимальное время регистрации для заданной геометрии при различных скоростях вращения крыльчатки и вязкости жидкости независимо от размеров резервуара.

Работа была поддержана грантом Агентства Чешской Республики проект № 16-20175S и Министерством образования, юности и спорта Чешской Республики проект № LO1201 (Национальная Программа устойчивого развития I) и RVO:67985874.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cheng D., Feng X., Cheng J., Yang Ch.* Numerical simulation of macro-mixing in liquid–liquid stirred tanks // *Chem. Eng. Sci.* 2013. V. 101. P. 272.
2. *Yeoh S.L., Papadakis G., Yianneskis M.* Determination of mixing time and degree of homogeneity in stirred vessels with large eddy simulation // *Chem. Eng. Sci.* 2005. V. 60. P. 2293.
3. *Šulc R., Kysela B., Dítl P.* Time evolution of the drop size distribution for liquid–liquid dispersion in an agitated tank // *Chem. Papers.* 2018. V. 72. P. 543.
4. *Kysela B., Konfršt J., Chára Z., Kotek M.* Evaluation and accuracy of the local velocity data measurements in an agitated vessel // *EPJ Web Conf.* 2014. V. 67. Article 02065.
5. *Šulc R., Dítl P., Fořt I., Jašíkova D., Kotek M., Kopecký V., Kysela B.* The minimum record time for PIV measurement in a vessel agitated by a Rushton turbine // *EPJ Web Conf.* 2017. V. 143. Article 02121.
6. *Šulc R., Dítl P., Fořt I., Jašíkova D., Kotek M., Kopecký V., Kysela B.* The effect of Particle Image Velocimetry setting parameters on local velocity measurements in an agitated vessel // *Chem. Eng. Technol.* 2019. V. 42. P. 827.
7. *Unadkat H., Rielly Ch.D., Nagy Z.K.* PIV study of the flow field generated by a sawtooth impeller // *Chem. Eng. Sci.* 2011. V. 66. P. 5374
8. *Шульц Р., Дитль П.* Местная скорость диссипации энергии в перемешиваемом резервуаре. Сравнение методов расчета // *Изв. РАН. МЖГ.* 2018. № 2. С. 27–39.
9. *Fořt I., Obeid A., Březina V.* Flow of liquid in a cylindrical vessel with a turbine impeller and radial baffles // *Coll. Czechoslov. Chem. Comm.* 1982. V. 47. P. 226.
10. *Fořt I., Jirout T., Rieger F., Allner R., Sperling R.* Study of the blending efficiency of pitched blade impellers // *Acta Polytechnica.* 2011. V. 41. P. 7.
11. *Bowerman B.L., O'Connell R.T.* Applied Statistics: Improving Business Processes. USA: Richard D. Irwin, 1997.

*Перевод Е.А. Пушкаря*

## The Minimum Recording Time for Piv Measurements in a Vessel Agitated by a High-Shear Tooth Impeller

**R. Šulc<sup>1,\*</sup>, P. Dítl<sup>1</sup>, D. Jašíkova<sup>2</sup>, M. Kotek<sup>2</sup>, V. Kopecký<sup>2</sup> and , B. Kysela<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Czech Technical University in Prague, Faculty of the Mechanical Engineering, Department of Process Engineering, Prague, 160 00, Czech Republic*

<sup>2</sup> *Technical University of Liberec, Institute for Nanomaterials, Advanced Technology and Innovation, Liberec, 461 17, Czech Republic*

<sup>3</sup> *Czech Academy of Sciences, Institute of Hydrodynamics, Prague, 166 12, Czech Republic*  
# e-mail: radek.sulc@fs.cvut.cz

**Abstract**—The flow field in a mechanically agitated vessel has often been investigated by Particle Image Velocimetry (PIV). In published studies, the recording time ranges between tenths of seconds and units of seconds. The question arises: What is the minimum recording time that is needed to obtain relevant data? Our study was aimed at determining the minimum recording time that is required to get consistent velocity field results, using the PIV technique, in a vessel agitated by a high-shear tooth impeller within the impeller flow discharge zone. Our results help to adjust PIV experimental conditions that guarantee correct velocity data. The tests were performed in a fully-baffled cylindrical flat-bottom vessel 400 mm in inner diameter agitated by a tooth impeller 133 mm in diameter, with three different liquids, using 2-D Time-Resolved PIV in the impeller Reynolds number range from 68 000 to 221 000. A statistical analysis of the radial and axial components of the mean and fluctuation velocities measured in the impeller discharge flow showed that the dimensionless minimum recording time is independent of the impeller Reynolds number. The value is  $Nt_{Rmin} = 62$  for the mean radial velocity and fluctuation velocities in both the radial direction and the axial direction, while a longer measuring time,  $Nt_{Rmin} = 174$ , is required to obtain the consistent mean axial velocity for  $\pm 2\%$  volatility. The dimensionless criterion  $Nt_{Rmin} = \text{const}$  is recommended as the scale-up rule for an estimate of the minimum recording time.

*Keywords:* mixing, high-shear tooth impeller, Particle Image Velocimetry, recording time