

DORIN CERES, TOMÁŠ JIROUT, FRANTIŠEK RIEGER*, PAVEL SEICHTER**

ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ЛОПАТОК НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ
СУСПЕНДИРОВАНИЯ БЫСТРОХОДНЫХ МЕШАЛОК

EFFECT OF IMPELLERS BLADE SHAPE
ON PARTICLES SUSPENSION

А н н о т а ц и я

Для суспендирования часто используются быстроходные мешалки, вызывающие в сосуде осевое течение. Цель этой работы сравнить эффективность суспендирования различных видов мешалок, разной геометрической конфигурации, а именно стандартизированных быстроходных мешалок и мешалок, разработанных фирмой Techmix s.r.o. В том числе сравнить их потребляемую мощность.

Ключевые слова: перемешивание суспензии, эффективность мешалок, электродиффузионная диагностика

A b s t r a c t

For off-bottom particle suspending, high speed turbines inducing axial flow in vessels are frequently used. The objective of this paper is to compare the suspending ability of various types and geometrical configurations of high-speed impellers (i.e. impellers in accordance with industrial standards of the Czech Republic and impellers designed by Techmix Ltd.). For the identification of reaching the off-bottom suspending state, a new and objective electrochemical method was used in the experiments. This experimental method eliminates the much less precise and commonly used visual method used so far.

Keywords: mixing of suspensions, effectiveness of impellers, electrochemical diagnostic

* Ing. Dorin Ceres, Ing. Tomáš Jirout, Ph.D., Prof. Ing. František Rieger, DrSc., Czech Technical University in Prague.

** Ing. Pavel Seichter, CSc., Techmix s.r.o.

1. Введение

Перемешивание в жидкой среде одна из самых распространённых операций в химической, пищевой и потребительской промышленности. Цель перемешивания состоит в интенсификации переноса тепла и массы и в приготовлении смесей с заданными свойствами, например суспензий и эмульсий. Одна из самых распространённых операций в промышленности – это перемешивание суспензии, которое часто сопровождается передачей массы и химическими реакциями. Для суспендирования часто используются быстроходные мешалки, вызывающие в сосуде осевое течение.

Для проектирования, эксплуатации, восстановления аппаратов-суспензаторов, а также для гомогенизации суспензий нужно знать критическую частоту вращения и потребляемую мощность мешалок, необходимую для достижения взвешенного состояния твёрдой фазы (т.е. состояние, когда при перемешивании все частицы взвешены в жидкости, и ничего не остается на дне сосуда). На эти проектные и эксплуатационные параметры влияют не только свойства суспензии (физические свойства твёрдой фазы и жидкости, размер и концентрация частиц), см. [1–3], но и геометрическая конфигурация аппарата-суспензатора (форма сосуда, форма, тип и количество лопаток мешалки, и их взаимное геометрическое расположение). Цель этой работы сравнить эффективность суспендирования различных видов мешалок, разной геометрической конфигурации, а именно стандартизированных быстроходных мешалок и мешалок, разработанных фирмой Techmix s.r.o.

2. Описание эксперимента

Суспендируемые эксперименты проводились в цилиндрическом сосуде с эллиптическим днищем, внутренний диаметр сосуда $D = 300$ mm. Внутренние стенки сосуда были оснащены четырьмя стандартными отражательными перегородками с шириной $b = 0,1 \cdot D$. Уровень жидкости был равен внутреннему диаметру сосуда $H = D$. Схема экспериментального аппарата показана на рис. 1.

В ходе эксперимента измерялась эффективность суспендирования следующих моделей мешалок:

- стандартизированные шести и четырех лопастные мешалки с лопатками склоненными под углом 45° (рис. 2a),
- трехлопастная и четырех лопастная мешалка с ровными ломаными лопатками с профилем лопаток согласно CVS 69 1043 (рис. 2b),
- лопастные мешалки с криволинейной формой лопаток согласно CVS 69 1027 (рис. 2c),
- мешалки фирмы Techmix s.r.o. с обозначением TX 335 (рис. 3a), TX 445 (рис. 3b), TX 535 (рис. 3c).

Геометрические параметры испытуемых мешалок показаны в таб. 1. Направление вращения мешалок было выбрано так, чтобы суспензия двигалась к днищу сосуда. Критическая частота оборотов мешалок была установлена при помощи электродиффузионной диагностики, которая устраняет недостатки визуальных методов, см.[4–6].

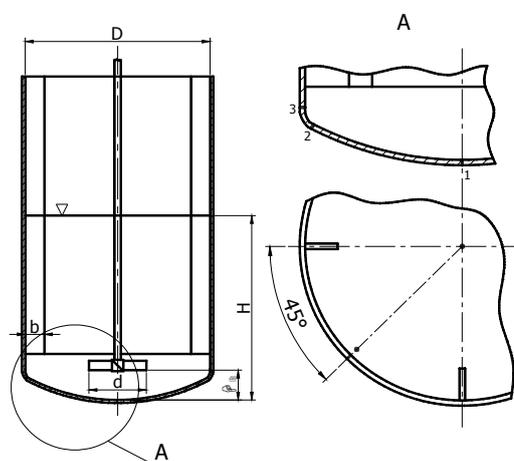


Рис.1. Схема аппарата для проведения эксперимента и размещение электродиффузионных зонд (1, 2 и 3)

Fig. 1. Scheme of experimental equipment and arrangement of electrodiffusion (ED) probes on vessel bottom (1, 2 and 3)

Таблица 1
Геометрические параметры аппарата-суспензатора и использованных мешалок

| Мешалки | i_L | D | D/d | h/d | H_2/d |
|----------------------|-------|------|-------|-------|----------|
| | | [mm] | | | |
| 3RLL | 3 | 300 | 3 | 0,2 | 0,5 |
| 4RLL | 4 | 300 | 3 | 0,2 | 0,33–1 |
| TX535 | 4 | 300 | 3 | | 0,33–1 |
| TX445 | 4 | 300 | 3 | | 0,33–1 |
| TX335 | 4 | 300 | 3 | | 0,33–1 |
| 4SL45 | 4 | 300 | 3 | 0,2 | 0,5 |
| 6SL45 $D/d = 4,5$ | 6 | 300 | 4,5 | 0,2 | 0,5 |
| 6SL45 $D/d = 3$ | 6 | 300 | 3 | 0,2 | 0,5 |
| Pf 0,1 | 3 | 300 | 2 | 0,1 | 0,1–0,15 |
| Pf 0,15 | 3 | 300 | 2 | 0,15 | 0,1–0,15 |

Эллиптическое днище сосуда было оснащено тремя электродиффузионными (ЭД) зондами. Зонды были расположены в центре днища под мешалкой и в переходной части между эллиптическим днищем и корпусом цилиндра сосуда, где взвешенное состояние достигается позднее (рис. 1). В качестве вспомогательного электрода были использованы полированные нержавеющие радиальные отражательные перегородки.

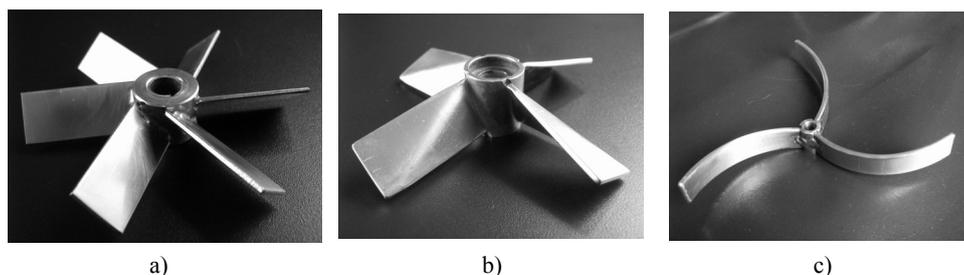


Рис. 2. Стандартные типы мешалок согласно чешским отраслевым нормам: а) шести лопастная мешалка с лопатками под углом 45°, б) четырех лопастная мешалка с ровными ломаными лопатками ($\alpha = 67^\circ$, $\beta = 25^\circ$, $\gamma = 48^\circ$) согласно CVS 69 1043, в) лопастная мешалка с криволинейной формой лопаток согласно CVS 69 1027

Fig. 2. Standard type of impellers: a) pitched six-blade turbine with pitch angle 45°, b) pitched four-blade turbine with diagonally folded blades according to Czech standard CVS 69 1043 ($\alpha = 67^\circ$, $\beta = 25^\circ$, $\gamma = 48^\circ$), c) curved-blade turbine according to Czech standard CVS 69 1027

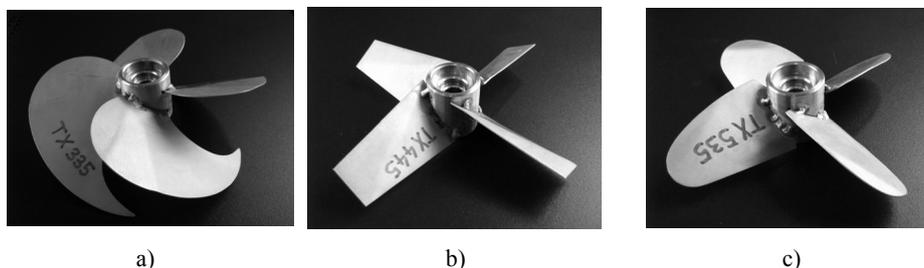


Рис. 3. Мешалки фирмы Techmix s.r.o.: a) TX 335, b) TX 445, c) TX 535

Fig. 3. Impellers designed by Techmix Ltd. Company: a) TX 335, b) TX 445, c) TX 535

Модельные суспензии были изготовлены из электролита (водяной раствор 2,5 % массы NaCl) и стеклянных частиц с средним объемным диаметром $d_p = 0,25$ мм и с средней объемной концентрации твердой фазы в диапазоне $c_v = 2,5 - 30$ %.

3. Анализ измерений

Для идентификации взвешенного состояния была использована нововведенная аппликация электродиффузионной диагностики. Этот метод основан на измерении диффузионного электрического тока, который проходит из рабочей зонды, встроенной в днище сосуда через электролит на коллекторный электрод. Методика определения взвешенного состояния с помощью этого методу показана на рис. 4.

Электродиффузионный метод идентификации взвешенного состояния твердой фазы более подробно описан в [4–6].

При расчете привода мешалки (коробка передач, электродвигатель, вал) при заданных оборотах необходимо знать ее мощность. Для расчета мощности используется так называемая характеристика мощности.

В этой работе была определена характеристика мощности всех мешалок и сравнены их потребляемые мощности для приведения частиц во взвешенное состояние при конкретных условиях. То есть, для конкретной геометрической конфигурации аппарата-суспензатора и для конкретных физических свойств суспензий (объемная концентрация твердой фазы, размер частиц, и т.д.).

Характеристика мощности определяется при помощи вращательного столика. Столик состоит из станины, вращательной тарелки и тензодатчика, который связан с устройством, регистрирующим результаты измерений. Принцип работы столика заключается в процессе перемешивания жидкости в сосуде, что заставляет сосуд вращаться, а в последствии и тарелки, на которой находится сосуд. Тензодатчик, который связан с тарелкой, в последствии дает электрический сигнал. Этот сигнал обрабатывается в регистрирующем устройстве и преобразуется на крутящий момент вала мешалки. Исходя из этого, определяется мощность мешалки а, следовательно, критерий мощности Po . Измерения производятся с постепенным увеличением частоты оборотов мешалки в турбулентной области течения. С образованием пузырьков

в жидкости измерения прекращаются. Из большого количества измерений находится средняя величина критерия мощности.

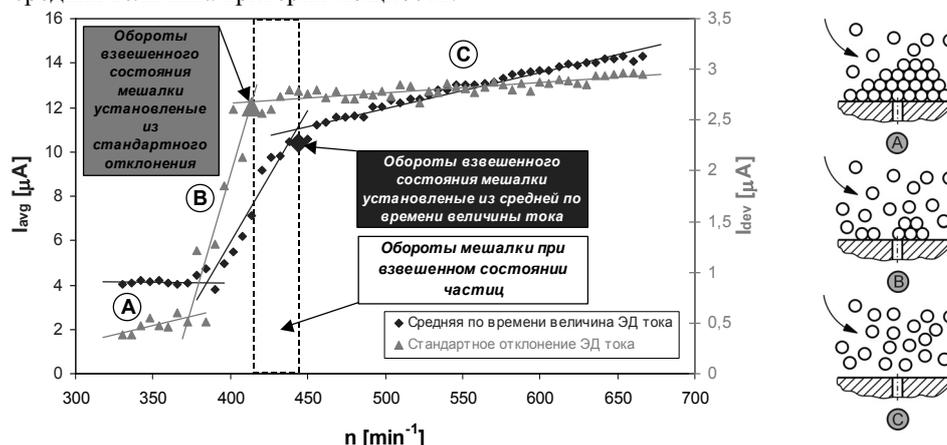


Рис. 4. Методика определения частоты оборотов мешалки необходимой для приведения частиц во взвешенное состояние на наблюдаемой ЭД зонде. В том числе показания зависимости средней по времени величины и стандартного отклонения электродиффузионного тока на частоту оборотов мешалки

Fig. 4. Defining methodology of just-suspended impeller speed by electrochemical method. Typical dependence of arithmetic mean value and standard deviation of probe electric current on impeller speed

4. Выводы и заключение

4.1. Эффективность суспендирования мешалок

В ходе суспендирующих экспериментов было выявлено не только влияние отдельных геометрических параметров мешалки (модель, форма и количество лопаток, диаметр), но и влияние расположения мешалки от дна сосуда. Результаты экспериментов были показаны на конференции CHISA 2007, см. [7].

Для некоторых стандартных моделей мешалок уже описано из многих предыдущих экспериментов влияние их расположения от дна сосуда на суспендирующие эффекты, см. в [8]. Для новых экспериментальных мешалок было необходимо наблюдать эту зависимость.

Результаты были обработаны в форме зависимости критической частоты оборотов мешалок от их расположения от дна сосуда. Из этого сравнения, очевидно, что все испытанные мешалки показали максимальное значение критических частот оборотов, при максимальном расстоянии нижней грани мешалки от дна сосуда. Мешалки фирмы Techmix s.r.o. показывают меньшую зависимость высоты размещения от дна сосуда, чем стандартные модели мешалок.

Из сравнения критической частоты оборотов аксиальных мешалок для разных геометрических параметров, очевидно, что при сохранении постоянной высоты

мешалок ($H_2 = 0,5 \cdot d$) от дна сосуда снижается величина частоты оборотов мешалок с увеличением количества лопаток и диаметра мешалки. Мешалки с профилированными лопатками не показали большого отклонения в величинах частот оборотов в сравнении со стандартными моделями аксиальных мешалок, однако, при сравнении суспендирующей эффективности нужно учесть и характеристику мощности наблюдаемых мешалок. У мешалок с профилированными лопатками, возможно, наблюдать низкую величину критерия мощности по сравнению со стандартизированными мешалками а следовательно, и большую суспендирующую эффективность. Радиальные мешалки с криволинейной формой лопаток показывают низкие величины критической частоты оборотов по сравнению с аксиальными мешалками. Однако эти радиальные мешалки имеют больший диаметр, чем аксиальные мешалки, что ведет к перепаду энергетической эффективности необходимой для суспендирования.

4.2. Потребляемая мощность мешалок

В этой работе были сравнены потребляемые мощности мешалок для приведения частиц во взвешенное состояние при конкретной геометрической конфигурации аппарата-суспензатора и для конкретных физических свойств суспензии.

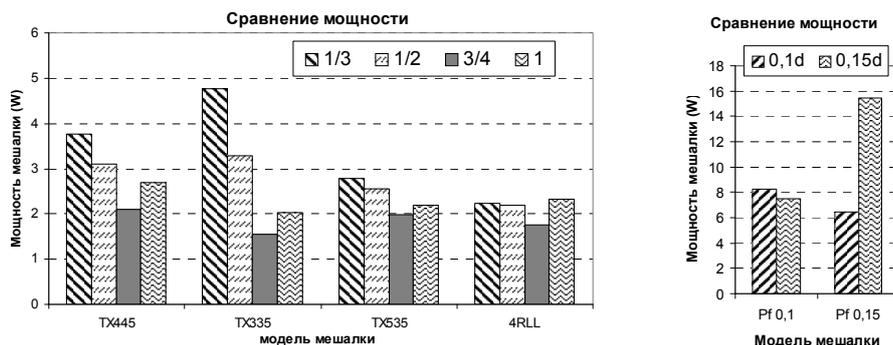


Рис. 5. Влияния расположения мешалок от дна сосуда на величину потребляемой мощности, необходимую для сохранения взвешенного состояния частиц для $d_p = 0,25$ мм и $c_v = 2,5\%$

Fig. 5. Effect of impeller off-bottom clearance on power consumption, necessary for particle suspension for $d_p = 0,25$ mm and $c_v = 2,5\%$

Результаты экспериментов показаны в рисунках 5, 6 и 7. Из графиков заметим что, у мешалок фирмы Techmix s.r.o. и у четырех лопастной мешалки с ровными ломаными лопатками, почти во всех случаях, оптимальным расстоянием от дна сосуда, с точки зрения потребляемой мощности, является $H_2/d = 3/4$. У мешалок типа „Pf” малая потребляемая мощность отмечается при меньшем расстоянии от дна сосуда. Из сравнения потребляемых мощностей стандартных моделей мешалок (рис. 7), заметим, что лучшая эффективность суспендирования наблюдается у мешалок с ровными ломаными лопатками типа 3RLL и 4RLL.

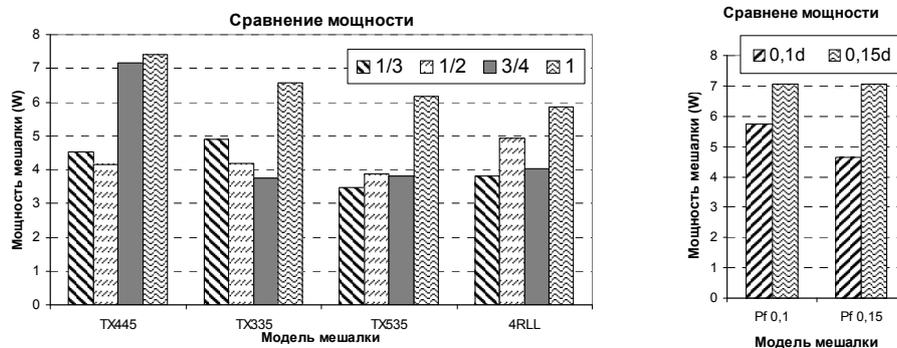


Рис. 6. Влияния расположения мешалок от дна сосуда на величину потребляемой мощности необходимой для сохранения взвешенного состояния частиц для $d_p = 0,25$ мм и $c_v = 10\%$

Fig. 6. Effect of impeller off-bottom clearance on power consumption, necessary for particle suspension for $d_p = 0,25$ mm and $c_v = 10\%$

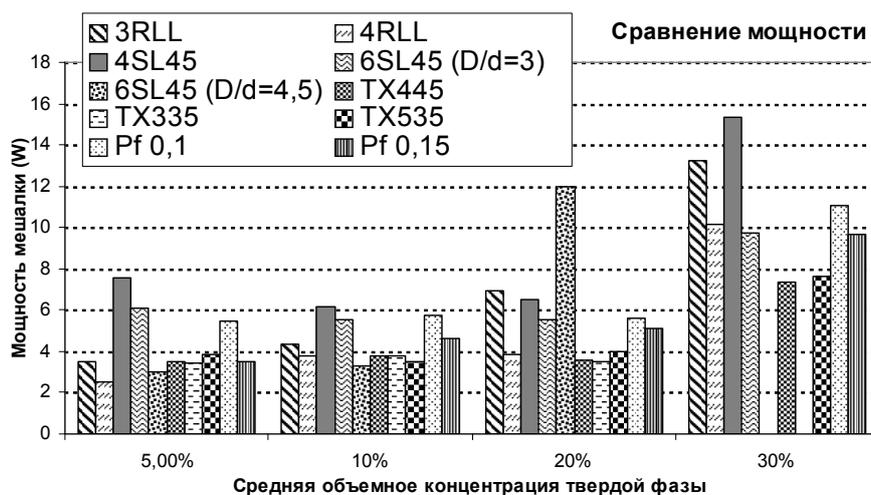


Рис. 7. Потребляемая мощность мешалок необходимая для сохранения взвешенного состояния частиц при оптимальном расстоянии мешалки от дна сосуда, для $d_p = 0,25$ мм и $c_v = 5-30\%$

Fig. 7. Comparison of power requirements for particle suspension of tested impellers operated in optimal off-bottom clearance for $d_p = 0,25$ mm and $c_v = 5-30\%$

Символы

| | | |
|-------------------------|---|--------------------|
| b | – ширина отражательных перегородок | [m] |
| c_v | – средняя объемная концентрация твердой фазы | |
| D | – диаметр сосуда | [m] |
| d | – диаметр мешалки | [m] |
| d_p | – средний объемный диаметр частиц | [m] |
| H | – высота жидкости | [m] |
| H_2 | – расстояние нижнего края лопатки мешалки от дна аппарата | [m] |
| h | – ширина лопатки | [m] |
| I | – электрический ток | [A] |
| i_L | – количество лопаток | |
| n | – число оборотов мешалки | [s ⁻¹] |
| n_{cr} | – критическое число оборотов мешалки | [s ⁻¹] |
| P | – потребляемая мощность | [W] |
| Po | – критерий мощности | |
| α, β, γ | – угол наклона лопаток | [°] |

Нижние индексы

| | |
|-------|---------------------------------------|
| avg | – Средняя по времени величина ЭД тока |
| dev | – Стандартное отклонение ЭД тока |

Обозначения мешалок

| | |
|-------|--|
| 4SL45 | – Стандартная четырех лопастная мешалка с лопатками под углом 45° |
| 6SL45 | – Стандартная шести лопастная мешалка с лопатками под углом 45° |
| 3RLL | – Трех лопастная мешалка с ровными ломаными лопатками с формой лопаток согласно CVS 69 1043 |
| 4RLL | – Четырех лопастная мешалка с ровными ломаными лопатками с формой лопаток согласно CVS 69 1043 |
| Pf | – Лопастная мешалка с криволинейной формой лопаток согласно CVS 69 1027 |
| TX335 | – Мешалка фирмы Techmix s.r.o. с обозначением TX 335 |
| TX445 | – Мешалка фирмы Techmix s.r.o. с обозначением TX 445 |
| TX535 | – Мешалка фирмы Techmix s.r.o. с обозначением TX 535 |

Литература

- [1] Rieger F., Dittl P.: *Suspension of solid particles*, Chem. Eng. Sci., **49**, 1994, 2219-2227.
- [2] Rieger F.: *Effect of particle content on agitator speed for off-bottom suspension*, Chem. Eng. J., **79**, 2000, 171-175.
- [3] Rieger F.: *Effect of particle content on agitator speed for off-bottom suspension*, Chem. Eng. Proces., **41**, 2002, 381-384.
- [4] Jirout T., Moravec J., Rieger F.: *Electrochemical Measurement of the Impeller Speed for Off-Bottom Suspension in a Dish-Bottomed Vessel*, Inżynieria Chemiczna i Procesowa (Chemical and Process Engineering), **27**, 2006, 1507-1516.

- [5] Jirout T., Moravec J., Rieger F., Sinevič V., Špidla M., Sobolík V., Tihon J.: *Electrochemical Measurement of Impeller Speed for off-Bottom Suspension*, Inżynieria Chemiczna i Procesowa (Chemical and Process Engineering), **26**, 2005, 485-497.
- [6] Jirout T., Moravec J., Rieger F.: *Electrochemical Measurement of Impeller Speed for off-Bottom Suspension – Effect of Electrolyte Properties*, [in] Proceedings of the 12th European Conference on Mixing, Milano: AIDIC Servizi S.r.l., 2006, 423-430.
- [7] Ceres D., Jirout T., Rieger F., Seichter P.: *Vliv tvaru lopatek na suspenzační účinky rychloběžných míchadel*, [in] 54. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2007 [CD-ROM], Praha: Česká společnost chemického inženýrství, 2007.
- [8] Kasat G. R., Pandit A.B.: *Review on Mixing Characteristics in Solid-Liquid and Solid-Liquid-Gas Reactor Vessels*, Can. J. Chem. Eng., **83**, 2005, 618-643.

Робота выполнена при финансовой поддержке Министерства образования, молодежи и физической культуры ЧР: MSM6840770035.