

## РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА\*

С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, А. В. Стрижков

*Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»,  
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; karp@mail.gaps.tstu.ru*

**Ключевые слова и фразы:** конечно-элементный анализ; расчет параметров механических перемешивающих устройств.

**Аннотация:** Приведены результаты применения системы конечно-элементного анализа SolidWorks Flow Simulation для определения характеристик процесса механического перемешивания в вертикальном емкостном аппарате согласно пожеланиям работников промышленных предприятий по модернизации методики расчета параметров конструкции механических перемешивающих устройств, рекомендованной НИИхиммашем. Отмечено, что результаты расчетов в системе SolidWorks Flow Simulation для стандартных мешалок и установившегося режима перемешивания хорошо согласуются с результатами расчетов по методике НИИхиммаша.

---

Расчет конструктивных параметров механических перемешивающих устройств (МПУ) промышленных вертикальных емкостных аппаратов в настоящее время осуществляется согласно руководящему нормативному документу Санкт-Петербургского филиала НИИхиммаш [1]. Целью расчета МПУ является ответ на вопрос: способно ли устройство обеспечить требуемые условия реализации указанных процессов в рассматриваемом аппарате при выполнении ограничений на геометрические размеры мешалки, глубину центральной воронки и потребляемую мощность. При отрицательном ответе на данный вопрос возникает задача выбора оптимальной конструкции МПУ. Рассматриваемая задача весьма актуальна, так как вертикальные емкостные аппараты в разные периоды эксплуатации могут входить в состав различных технологических систем и использоваться для осуществления разных процессов.

Методика автоматизированного расчета и выбора оптимальной конструкции МПУ предусматривает составление и решение уравнения равновесия перемешиваемой среды (равенство крутящего момента, образующегося при вращении лопастей мешалки, сумме моментов сил сопротивления вращению, возникающих на стенках аппарата и внутренних устройствах) [1 – 4].

В последние годы результаты расчетов МПУ по методике [1] не вполне удовлетворяют промышленные предприятия, так как она предусматривает расчет только для установившегося режима перемешивания и непригодна для расчета устройств с нестандартными мешалками и многоярусных устройств с мешалками разных конструкций и размеров. Приведем рекомендуемые проектно-конструк-

---

\* По материалам доклада на конференции ММТТ-2014.

торским отделом и центральной заводской лабораторией ОАО «Пигмент», г. Тамбов требования к системе моделирования процесса механического перемешивания и расчета параметров МПУ.

1. Возможность расчета потребляемой мощности для перемешивающих устройств произвольной конфигурации, в частности:

- гибридных устройств – многоярусных со стандартными мешалками различных типов и размеров;
- устройств с различного рода скребками, скользящими по внутренней поверхности аппарата;
- устройств с нестандартными мешалками, методика расчета которых не стандартизована и не представлена в литературе.

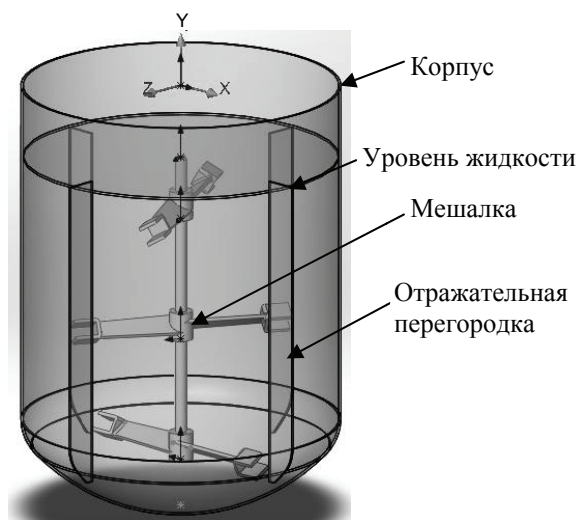
2. Учет возможности изменения физико-механических свойств реакционных сред в процессе перемешивания (главным образом, вязкости).

3. Возможность определения зон оптимального расположения внутренних теплообменных устройств и загрузки сырья:

- выявление застойных зон, в которых возможен локальный перегрев и налипание компонентов перемешиваемой среды на стенки аппарата и внутренние устройства;
- обеспечение интенсивного перемещения перемешиваемой среды вдоль теплообменных поверхностей путем подбора параметров конструкции и режима работы перемешивающего устройства;
- выявление элементов объема аппарата, где интенсивность перемешивания максимальна, и конструктивное оформление загрузки сырья именно в эти зоны.

4. Обеспечение возможности визуального анализа характера потоков перемешиваемой среды, распределения в ней газообразной и твердой фаз при вспенивании, загрузке в аппарат льда или твердого неорганического сырья.

Предпринята попытка реализовать некоторые из этих пожеланий с применением системы конечно-элементного анализа SolidWorks Flow Simulation, предназначенной для расчетов процессов движения газов, жидкостей и сопутствующих тепловых процессов. Применение данной системы требует предварительной разработки максимально точной геометрической модели МПУ и внутреннего объема аппарата. В качестве примера на рис. 1 представлена геометрическая модель реактора получения сульфаминовой кислоты (САК) с нестандартным МПУ.



**Рис. 1. Геометрическая модель реактора получения сульфаминовой кислоты**

Основным методом конечно-элементного анализа, используемым в системе SolidWorks Flow Simulation, является метод конечных объемов (численный метод решения дифференциальных уравнений). Для нахождения искомого численного решения непрерывная математическая модель физических процессов, используемая в SolidWorks Flow Simulation, дискретизируется как в пространстве (вся расчетная область покрывается сеткой конечных элементов (КЭ)), так и во времени. Метод конечных объемов предусматривает расчет значений переменных в центрах КЭ (не в узлах расчетной сетки) с выбранным шагом по времени. Конечные элементы имеют форму параллелепипедов. При решении внутренних задач, то есть при расчете поведения перемешиваемой среды в объеме аппарата используется метод фиктивных областей, то есть формально расчетная сетка строится в параллелепипедообразной области, покрывающей геометрическую модель аппарата с перемешиваемой средой внутри. Расчеты производятся только в ячейках, попавших в расчетную область.

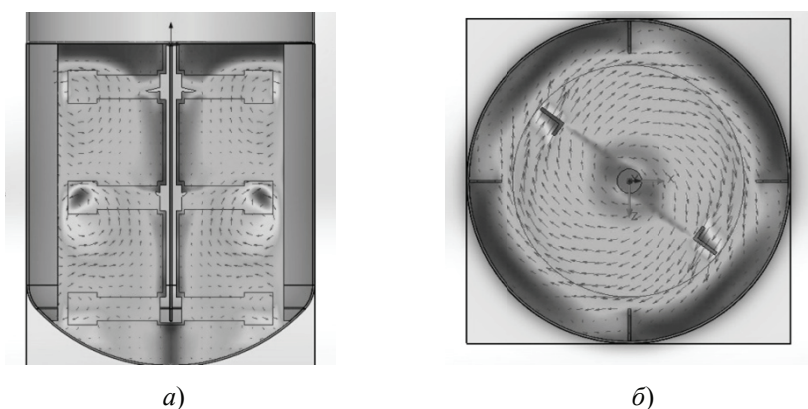
Одним из важнейших этапов расчета процесса перемешивания с применением системы SolidWorks Flow Simulation является задание расчетной сетки КЭ. Система может построить сетку по умолчанию, но она редко оказывается приемлемой, так как не учитывает специфики рассматриваемого процесса. Параметры расчетной сетки, как правило, задаются вручную.

После проведения ряда экспериментов найдены параметры расчетной сетки КЭ, которые удовлетворяют требованиям к точности получаемых результатов и времени их получения, для этого использовалась как основная сетка, формируемая системой, так и локальная для области вокруг мешалок, оказывающей определяющее влияние на формирование поля скоростей в аппарате (рис. 2).

Для фиксированной геометрической модели и фиксированных параметров расчетной сетки КЭ система SolidWorks Flow Simulation позволяет получить значения скорости потока в любой точке объема аппарата для любого момента времени, изображения поля скоростей в различных сечениях аппарата (рис. 3), профиля потоков перемешиваемой среды в любой момент времени (рис. 4), и в динамике (в форме видеоролика).



Рис. 2. Расчетная сетка КЭ для реактора получения сульфаминовой кислоты



**Рис. 3. Поле скоростей для установившегося режима перемешивания в реакторе получения сульфаминовой кислоты при частоте вращения МПУ  $30 \text{ мин}^{-1}$ :  
 а – для центрального продольного сечения;  
 б – для центрального поперечного сечения**



**Рис. 4. Изображение потоков перемешиваемой среды в реакторе получения сульфаминовой кислоты**

Кроме того, можно получить зависимость крутящего момента от времени в период разгона (рис. 5), от значения которого прямо зависит потребляемая мощность

$$N = C M_{\text{кр}} \rho n^3 d_{\text{м}}^5,$$

где  $C$  – константа;  $M_{\text{кр}}$  – крутящий момент, Н·м;  $\rho$  – плотность перемешиваемой среды,  $\text{кг/м}^3$ ;  $n$  – частота вращения МПУ,  $\text{с}^{-1}$ ;  $d_{\text{м}}$  – диаметр мешалки, м.

Заметим, что значения момента в период разгона могут в несколько раз превышать его значение для установившегося режима (см. рис. 5).

Для проверки адекватности результатов расчетов, получаемых с применением системы SolidWorks Flow Simulation, проведены сравнительные расчеты крутящего момента  $M_{\text{кр}}$  и степени гомогенизации перемешиваемой среды для устано-

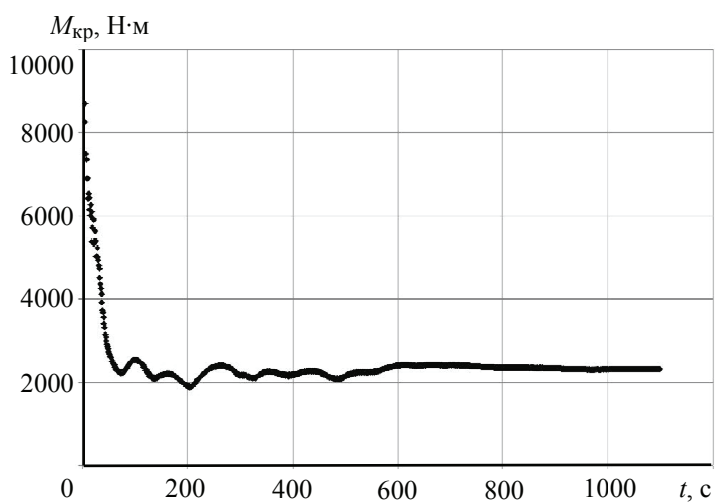
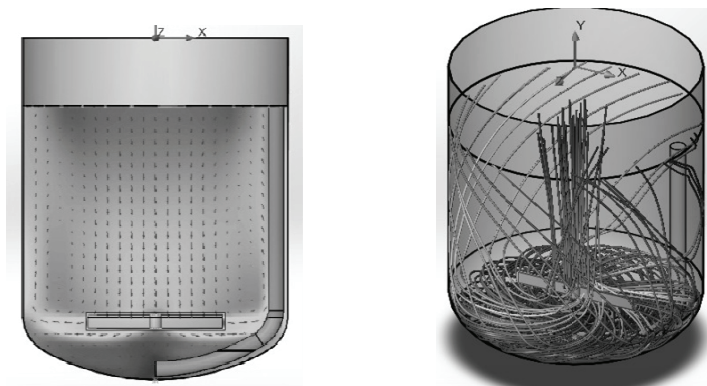
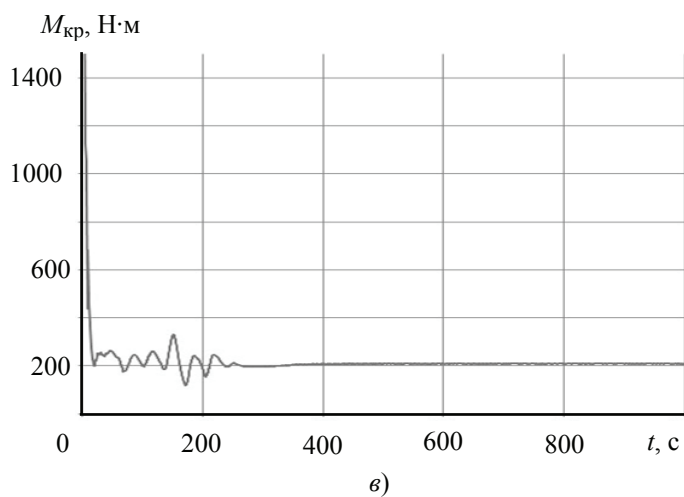


Рис. 5. Изменение крутящего момента в период разгона МПУ реактора получения сульфаминовой кислоты



а)

б)



в)

Рис. 6. Поле скоростей (а), потоки перемешиваемой среды (б) и зависимость крутящего момента от времени (в) для лопастной мешалки

вешегося режима перемешивания по методике [4] для аппаратов со стандартными мешалками (лопастной, трехлопастной, турбинной) (рис. 6). Максимальное рассогласование результатов не превышает 15 %.

Таким образом, применение системы конечно-элементного анализа SolidWorks Flow Simulation позволяет существенно расширить возможности моделирования процесса механического перемешивания по сравнению с методикой, рекомендованной НИИХиммашем, и позволит реализовать пожелания промышленных предприятий по модернизации методики расчета МПУ вертикальных емкостных аппаратов.

#### *Список литературы*

1. Руководящий нормативный документ. Механические перемешивающие устройства. Метод расчета. РД 26-01-90-85. – Л. : РТП ЛенНИИХиммаша, 1985. – 257 с.

2. Карпушкин, С. В. Система выбора конструкции механического перемешивающего устройства вертикального емкостного аппарата / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, Н. Н. Афанасьева // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2005. – Т. 11, № 2А. – С. 423 – 431.

3. Выбор оптимальных параметров механического перемешивающего устройства при ламинарном перемешивании / С. В. Карпушкин [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 488 – 492.

4. Карпушкин, С. В. Методика расчета и выбора механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, А. Б. Борисенко // Хим. промышленность сегодня. – 2011. – № 12. – С. 48 – 55.

---

## **Calculation of Mechanical Mixing Devices Using the System of Finite Element Analysis**

**S. V. Karpushkin, M. N. Krasnyanskiy, A. V. Strizhkov**

*Department “Computer-integrated systems in mechanical engineering”,  
TSTU; karp@mail.gaps.tstu.ru*

**Key words and phrases:** calculation of design parameters of mechanical agitators; finite element analysis.

**Abstract:** The paper describes the results of the application of the SolidWorks Flow Simulation finite element analysis to determine the characteristics of the process of mechanical mixing in a vertical reservoir to meet the requirements of industrial companies to improve the method of mechanical mixers design parameters calculation, recommended by Research Institute of Chemical Engineering. The results of calculations in the SolidWorks Flow Simulation for standard mixers and the mixing steady state match those of the method proposed by Research Institute of Chemical Engineering.

#### *References*

1. *Rukovodyashchii normativnyi dokument. Mekhanicheskie peremeshivayushchie ustroystva. Metod rascheta. RD 26-01-90-85* (Standardized Document RD 26-01-90-85: Mechanical Agitators: Design Method; effective from January 1, 1986), Leningrad: RTP LenNIkhimmasha, 1985, 257 p.

2. Karpushkin S.V., Krasnyanskii M.N., Afanas'eva N.N. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2005, vol. 11, no. 2A, pp. 423-431.

3. Karpushkin S.V., Serzhantova N.A., Istomin V.V., Posysaev I.A. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 488-492.

4. Karpushkin S.V., Krasnyanskii M.N., Borisenko A.B. *Chemical Industry Today*, 2011, no. 12, pp. 48-55.

---

### **Berechnung der mechanischen vermischenden Einrichtungen mit der Ausnutzung des Systems der Endelementenanalyse**

**Zusammenfassung:** Es werden die Ergebnisse der Anwendung des Systems der Endelementenanalyse SolidWorks Flow Simulation für die Bestimmung der Charakteristiken des Prozesses der mechanischen Vermischung im senkrechten kapazitiven Apparat laut den Wünschen der Arbeiter der industriellen Unternehmen nach der Modernisierung der Methodik der Berechnung der Parameter der Konstruktion der mechanischen Mischungseinrichtungen, die von Untersuchung Institut des chemischen Maschinenbaus emfolen wurde, angeführt. Die Ergebnisse der Berechnungen im System SolidWorks Flow Simulation für die standardmäßigen Rührer und das bestimmte Regime der Vermischung werden mit den Ergebnissen der Berechnungen nach der Methodik von Untersuchung Institut des chemischen Maschinenbaus gut übereinstimmen.

---

### **Calcul des dispositifs mécaniques d'agitation avec l'application du système de l'analyse d'éléments finis**

**Résumé:** Sont cités les résultats de l'application du système de l'analyse d'éléments finis SolidWorks Flow Simulation pour la définition des caractéristiques du processus de l'agitation mécanique dans un appareil de volume vertical. Les résultats des calculs dans le système SolidWorks Flow Simulation sont bien coordonnés avec ceux de la méthode NIICHIMMASH.

---

**Авторы:** *Карпушкин Сергей Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Краснянский Михаил Николаевич* – доктор технических наук, профессор, исполняющий обязанности ректора; *Стрижков Александр Владимирович* – аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Борщев Вячеслав Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

---