

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЕМКОСТНЫХ АППАРАТОВ

© 2022 Е. И. Мартьянов, С. В. Карпушкин, В. В. Алексеев✉

*Тамбовский государственный технический университет
ул. Советская, 106, 392000 Тамбов, Российская Федерация*

Аннотация. В статье представлены результаты решения задачи оптимизации режимных и конструктивных параметров механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов с применением алгоритма, который гарантирует получение оптимального решения задачи при минимальных затратах времени. Алгоритм разработан на основе метода перебора, реализованного с применением языка программирования Python и библиотеки SciPy, которая предназначена для выполнения научных и инженерных расчётов. Представлена структурная схема и поэтапная реализация разработанного алгоритма. Оценка быстродействия произведена на примере решения задачи определения конструктивных и режимных параметров открытой турбинной мешалки, установленной в вертикальном емкостном аппарате с эллиптическим днищем, которые обеспечивают максимальную интенсивность перемешивания.

Ключевые слова: алгоритмы оптимизации, вычислительная гидродинамика, механические перемешивающие устройства, интенсивность перемешивания.

ВВЕДЕНИЕ

Самым распространённым процессом химических, фармацевтических и пищевых производств является процесс перемешивания гомогенных или гетерогенных сред в вертикальных емкостных аппаратах с механическими перемешивающими устройствами (МПУ) [1, 6, 14].

При описании кинетики процесса механического перемешивания используются сложные математические конструкции, основанные на решении систем дифференциальных уравнений с частными производными [3, 20]. Реализация этого подхода на практике требует значительных вычислительных ресурсов и затрат времени на вычисления, поэтому обычно в промышленности применяется либо физический эксперимент в конкретной производственной ситуации, либо инженерная методика, рекомендованная к применению головными организациями [1].

В свою очередь, использование инженерных методик и проведение физического эксперимента также связано со значительными затратами времени на проведение необходимого количества экспериментов на лабораторных установках фиксированной конструкции [1, 6]. Помимо этого, требуются значительные финансовые затраты на изготовление масштабных моделей аппаратов и мешалок. Однако затраченные ресурсы не гарантируют получение оптимального решения, по причине ограниченности числа возможных сочетаний конструктивных и режимных характеристик МПУ. Иными словами, не всегда предоставляется возможность исследовать все сочетания из-за ограниченности во времени или финансах.

С целью снижения финансовых затрат и повышения точности определения значений искомых параметров используют системы инженерного анализа, такие как ANSYS Fluent или COMSOL Multyphysics [3, 14]. Однако эти системы очень требовательны к вычислительным мощностям квалификации персо-

✉ Алексеев Владимир Витальевич
e-mail: vvalex1961@yandex.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

нала, ориентированы на решение широкого круга задач и требуют настройки на рассматриваемую предметную область, в ходе которой возможны потери скорости вычисления и точности получаемых результатов.

Более эффективным подходом к оптимизации параметров МПУ является разработка проблемно-ориентированной системы управления и оптимизации (СУиО) конструктивных (диаметра мешалки, ширины и толщины ее лопастей, высоты установки мешалки над днищем аппарата) и режимных параметров (частоты вращения мешалки). Ее применение позволит получать оптимальные значения параметров, при которых достигается максимальная эффективность перемешивания, за счет применения специализированных математических методов и алгоритмов оптимизации.

1. АНАЛИЗ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вопросами гидродинамики в аппаратах с МПУ занимались многие ученые во всем мире в течении достаточно продолжительного времени. Среди современных отечественных ученых следует отметить труды Брагинского Л. Н., Барабаш В. М. и Бегачева В. И. Проведенные ими фундаментальные исследования [1] в области моделирования процессов механического перемешивания (ПМП) легли в основу современных инженерных методик расчета МПУ.

На данный момент, применение вычислительной гидродинамики (англ. CFD — Computational Fluid Dynamics) получило широкое распространение в различных сферах деятельности человека. Анализ публикаций по рассматриваемой тематике, показал, что наиболее интересные результаты содержатся в трудах отечественных ученых Войтовича Р. [2], Минибаевой Л. Р. [11] и Морданова С. В. [12], а также у зарубежных исследователей: А. К. М. Мохиуддин [13], Максимилиан Ф. Эгль [16], А. Очиенг [18] и Лей Ши [19].

Некоторые из них датируются 2008 г., это связано с тем, что исследования ПМП, а также процессов оптимизации конструкции МПУ не представляло большого интереса в науч-

ном сообществе. Однако данный процесс является ключевым в любой из производственных цепочек, где он применяется. Поэтому для создания более целостной картины по выбранной тематике связанной именно с исследованием ПМП в аппаратах с МПУ были использованы более ранние работы.

В представленных работах [2, 11–13, 16, 18, 19], как было сказано ранее, для определения значений параметров ПМП использована вычислительная гидродинамика, применение которой требует больших вычислительных мощностей, а также связано с принятием некоторых допущений при моделировании, которые влияют на достоверность получаемых результатов. Несмотря на отмеченные недостатки, данный подход является наиболее эффективным при условии, что применяемая модель ПМП адекватно его описывает.

В упомянутых выше и других подобных работах ставятся и решаются задачи определения одного конкретного параметра, либо представлены результаты однократного просчета фиксированной конструкции аппарата и мешалки, иными словами задача оптимизации комплекса конструктивных и режимных параметров МПУ не рассматривается.

В представленном нами исследовании задача решается посредством применения алгоритма оптимизации основанного на методе перебора.

Помимо применения CFD на данный момент начинает развиваться новое направление в исследованиях ПМП, а именно применение нейронных сетей для прогнозирования и определения целевых показателей готовой продукции.

Представителм данного направления являются Микито Кониси, Масанобу Инубуси и Сусуму Гото [17]. В его работах описана тренировка нейронной сети с целью обучения ее возможностям прогнозирования конечного состояния целевого продукта на основе имеющихся входных данных.

Данный подход очень интересен с точки зрения реализации, однако при этом точность получаемых результатов сильно зависит от достоверности полученных статистических данных, на которые нейронная сеть должна

ориентироваться. Как известно, для получения этих данных необходимо проводить достаточно сложные эксперименты. В статье [18] наглядно проиллюстрирована сложность организации подобного физического эксперимента, который необходимо производить для получения значений с заданной точностью.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для расчета конструктивных и режимных параметров МПУ использована модель кинетики ПМП (1)–(22) [8].

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{u}_L}{\partial t} + \bar{u}_L \frac{\partial \bar{u}_L}{\partial l} + \bar{u}_R \frac{\partial \bar{u}_L}{\partial r} + \frac{\bar{u}_\varphi}{r} \frac{\partial \bar{u}_L}{\partial \varphi} = \\ & = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_L}{\partial l} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_L}{\partial l^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_L}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{u}_L}{\partial r} + \right. \\ & \left. + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \bar{u}_L}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial l} (-\rho \bar{u}_L^2) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (-\rho r \bar{u}_L \bar{u}_R) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} (-\rho \bar{u}_L \bar{u}_\varphi) \right], \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{u}_R}{\partial t} + \bar{u}_L \frac{\partial \bar{u}_R}{\partial l} + \bar{u}_R \frac{\partial \bar{u}_R}{\partial r} + \frac{\bar{u}_\varphi}{r} \frac{\partial \bar{u}_R}{\partial \varphi} - \frac{\bar{u}_\varphi}{r} = \\ & = F_R - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_R}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_R}{\partial l^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_R}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{u}_R}{\partial r} + \right. \\ & \left. + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \bar{u}_R}{\partial \varphi^2} - \frac{\bar{u}_R}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial \bar{u}_\varphi}{\partial \varphi} \right) + \\ & + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial l} (-\rho \bar{u}_L \bar{u}_R) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (-\rho r \bar{u}_R^2) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} (-\rho \bar{u}_R \bar{u}_\varphi) + \frac{1}{r} (-\rho \bar{u}_\varphi^2) \right], \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{u}_\varphi}{\partial t} + \bar{u}_L \frac{\partial \bar{u}_\varphi}{\partial l} + \bar{u}_R \frac{\partial \bar{u}_\varphi}{\partial r} + \frac{\bar{u}_\varphi}{r} \frac{\partial \bar{u}_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\bar{u}_R \bar{u}_\varphi}{r} = \\ & = F_\varphi - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial P_\varphi}{\partial \varphi} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_\varphi}{\partial l^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{u}_\varphi}{\partial r} + \right. \\ & \left. + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \bar{u}_\varphi}{\partial \varphi^2} - \frac{\bar{u}_\varphi}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial \bar{u}_R}{\partial \varphi} \right) \\ & + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial l} (-\rho \bar{u}_L \bar{u}_\varphi) + \frac{\partial}{\partial r} (-\rho \bar{u}_R \bar{u}_\varphi) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} (-\rho \bar{u}_\varphi^2) + \frac{2}{r} (-\rho \bar{u}_R \bar{u}_\varphi) \right], \quad (3) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial l} (r \bar{u}_L) + \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{u}_R) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} (r \bar{u}_\varphi) = 0, \quad (4)$$

где $\bar{u}_L, \bar{u}_R, \bar{u}_\varphi$ — осредненные значения составляющих вектора скорости, м/с; $\bar{u}'_L, \bar{u}'_R, \bar{u}'_\varphi$ — пульсационные составляющие вектора скорости, м/с; t — время, с; l — уровень жидкости в аппарате, м; r — радиус емкости, м; φ — полярный угол, град; ν — кинематическая вязкость, м²/с; ρ — плотность жидкости, кг/м³; P_L, P_R, P_φ — гидродинамическое давление, Па; F_L, F_R, F_φ — массовые силы, Н.

$$P_L = \frac{\rho u_L^2}{2} + \rho g l, \quad (5)$$

где g — ускорение свободного падения, м/с².

$$P_R = \frac{\rho u_R^2}{2} + \rho g l, \quad (6)$$

$$P_\varphi = \frac{\rho u_\varphi^2}{2r} + \rho g l, \quad (7)$$

$$F_L = 0, \quad (8)$$

так как рассматривается однородная гомогенная жидкость, в которой не происходит процесса осаждения или расслоения.

$$F_R = \bar{R} \frac{\partial \varphi^2}{\partial t}, \quad (9)$$

где \bar{R} — радиус-вектор точки в рассматриваемой системе координат.

$$F_\varphi = \frac{P_{\text{дв.}}}{R} \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad (10)$$

где $P_{\text{дв.}}$ — мощность электродвигателя мешалки, Вт:

$$P_{\text{дв.}} = K_{NA} \cdot \rho \cdot n^3 \cdot D_m^5, \quad (11)$$

где K_{NA} — аналитический коэффициент мощности; n — частота вращения мешалки, об/мин; D_m — диаметр мешалки, м.

В данном конкретном исследовании используется коэффициент K_{NA} для открытой турбинной мешалки:

$$K_{NA} = \frac{0.00038}{\text{Re}^{0.43}}, \quad (12)$$

где Re — число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{n \cdot D_m^2}{60 \cdot \nu}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial l} (\rho k r \bar{u}_L) + \frac{\partial}{\partial r} (\rho k r \bar{u}_R) +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\rho k r \bar{u}_\varphi) = \frac{\partial}{\partial l} \left(a_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial l} \right) + \\
 & + \frac{\partial}{\partial r} \left(a_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(a_k \mu_{eff} \frac{1}{r} \frac{\partial k}{\partial \varphi} \right) + \\
 & + G_k + G_b - \rho \varepsilon, \quad (14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial l} (\rho \varepsilon r \bar{u}_L) + \frac{\partial}{\partial r} (\rho \varepsilon r \bar{u}_R) + \\
 & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\rho \varepsilon r \bar{u}_\varphi) = \frac{\partial}{\partial l} \left(a_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial l} \right) + \\
 & + \frac{\partial}{\partial r} \left(a_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(a_\varepsilon \mu_{eff} \frac{1}{r} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \varphi} \right) + \\
 & C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon, \quad (15)
 \end{aligned}$$

где k — кинетическая энергия, Н; ε — диссипация энергии; μ_{eff} — эффективная вязкость; a_k, a_ε — обратные эффективные числа Прандтля для k и ε соответственно ($a_k = a_\varepsilon = 1.393$); G_k — турбулентная кинетическая энергия, Вт; G_b — кинетическая энергия выталкивающей силы, Вт; $C_{1\varepsilon} = 1.42, C_{2\varepsilon} = 1.68, C_{3\varepsilon} = 1$ — эмпирические константы [2, 6, 11, 14, 21].

$$\begin{aligned}
 k = 0,5 \left(-\bar{u}_L'^2 - \bar{u}_L' \bar{u}_R' - \bar{u}_L' \bar{u}_\varphi' - \bar{u}_R'^2 - \right. \\
 \left. - \bar{u}_R' \bar{u}_\varphi' - \bar{u}_\varphi'^2 \right), \quad (16)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \varepsilon = \nu \frac{\partial}{\partial k} \left(-\bar{u}_L'^2 - \bar{u}_L' \bar{u}_R' - \bar{u}_L' \bar{u}_\varphi' - \bar{u}_R'^2 - \right. \\
 \left. - \bar{u}_R' \bar{u}_\varphi' - \bar{u}_\varphi'^2 \right), \quad (17)
 \end{aligned}$$

$$\mu_{eff} = 0,0845 \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
 G_k = -\rho \left[\bar{u}_L'^2 \frac{\partial}{\partial l} (r \bar{u}_L) + \bar{u}_L' \bar{u}_R' \frac{\partial}{\partial l} (r \bar{u}_R) + \right. \\
 + \bar{u}_L' \bar{u}_\varphi' \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial l} (r \bar{u}_\varphi) + \bar{u}_R'^2 \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{u}_R) + \\
 + \bar{u}_R' \bar{u}_L' \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{u}_L) + \bar{u}_R' \bar{u}_\varphi' \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{u}_\varphi) + \\
 + \bar{u}_\varphi'^2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} (r \bar{u}_\varphi) + \bar{u}_\varphi' \bar{u}_L' \frac{\partial}{\partial \varphi} (r \bar{u}_L) + \\
 \left. + \bar{u}_\varphi' \bar{u}_R' \frac{\partial}{\partial \varphi} (r \bar{u}_R) \right], \quad (19)
 \end{aligned}$$

$$G_b = 0,138 \mu_{eff} \left(\frac{\partial}{\partial l} + \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \right), \quad (20)$$

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (21)$$

где $C_\mu = 0.0845, \eta_0 = 4.38, \beta = 0.012$ — эмпирические константы [2, 6, 10, 13, 18].

$$\eta = \frac{\varepsilon}{k} \sqrt{\frac{\frac{\partial \bar{u}_L}{\partial r} + \frac{\partial \bar{u}_R}{\partial l} + \frac{\partial \bar{u}_R}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{u}_\varphi}{\partial r} + \frac{\partial \bar{u}_L}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{u}_\varphi}{\partial l}}}. \quad (22)$$

Представленная выше модель (1)–(22) обладает рядом отличий от классической вариации уравнений Навье — Стокса.

Главное отличие заключается в представлении ее в цилиндрической системе координат, что позволило сократить время, затрачиваемое на расчет, а также упростить уравнения массовых сил (8)–(10) и при этом не потерять в точности получаемых результатов. Также используется оригинальный способ формализации гидродинамического давления жидкости (5)–(7) основанный на интеграле Бернули. Помимо этого в ней не используется эмпирический коэффициент мощности K_N , а предложен его аналог K_{NA} , выведенный аналитически (12). Более подробное описание данной системы, а так же анализ ее эффективности представлены в литературе [10].

Ввиду того, что рассматривается задача условной одномерной оптимизации, то в качестве метода оптимизации параметров МПУ выбран метод перебора.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Определяющие размеры аппарата, а именно его диаметр D_t и высота H_t , как правило, являются стандартизированными и определяются технологическими возможностями производства [5, 6], поэтому данные параметры фиксированы:

$$D_t = 0.35 \text{ м}, \quad (23)$$

$$H_t = 0.5 \text{ м}. \quad (24)$$

Так как частота вращения МПУ является одним из определяющих параметров перемешивания, она задается интервалом, харак-

терным для открытой турбинной мешалки [1, 14]:

$$n \in [150, 350] \text{ об/мин}, \quad (25)$$

Помимо частоты вращения, на интенсивность перемешивания влияют конструктивные параметры, см. рис. 1: диаметр D_m мешалки, высота H_m , ширина L_m и толщина S_1 ее лопасти, а также количество лопастей N . Помимо этого, к конструктивным параметрам можно отнести диаметр диска D_d , его толщину S_2 и высоту установки мешалки над дном аппарата h_{hm} .

Диаметр D_m мешалки также задается интервалом, характерным для открытой турбинной мешалки [1, 14]:

$$D_m \in [0.3D_i, 0.4D_i] \text{ м}. \quad (26)$$

Однако не все конструктивные параметры могут свободно изменяться в заданных пределах, поэтому применяются следующие зависимости, выявленные в предыдущих исследованиях [9]:

- количество лопастей мешалки $N = 6$;
- отношение диаметра диска к диаметру мешалки $D/D_m = 0.8$;
- отношение ширины лопасти к диаметру мешалки $L_m/D_m = 0.25$;
- отношение высоты лопасти к диаметру мешалки $H_m/D_m = 0.3$;
- отношение высоты расположения мешалки над дном аппарата к высоте уровня жидкости в нем $h_{hm}/l = 0.3$;
- отношение толщины лопасти мешалки к ее ширине $S_1/H_m = 0.1$;
- отношение толщины диска мешалки к ее ширине $S_2/H_m = 0.1$.

В данном исследовании в качестве рабочей среды используется вода с характеристиками:

- температура — 20 °С;
- плотность — 1027 кг/м³;
- кинематическая вязкость — $1,006 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

В качестве критерия оптимальности решения задачи предлагается использовать суммарный вектор скорости жидкости в аппарате K_{SVS} [15]:

$$K_{SVS} = \sum_{i=1}^z \sqrt{\bar{u}_L^2 + \bar{u}_\varphi^2 + \bar{u}_R^2}, \quad (27)$$

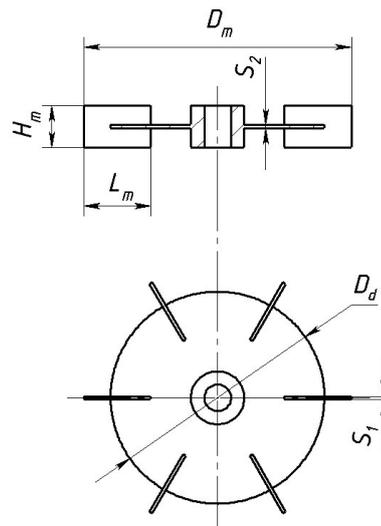


Рис. 1. Эскиз открытой турбинной мешалки [Fig. 1. Sketch of an open turbine agitator]

где z — общее число узловых точек в расчетной модели.

Таким образом, задача оптимизации параметров МПУ с открытой турбинной мешалкой формулируется следующим образом: при фиксированном диаметре D_i и высоте H_i аппарата найти диаметр мешалки D_m и частоту ее вращения n , при которых достигается максимально возможное значение K_{SVS} , а затраты мощности на перемешивание $P_{\text{дв.}}$ не превосходят допустимые более, чем на 10 %.

В формализованном виде задача представлена условиями (28)–(30):

$$K_{SVS} \rightarrow \max, \quad (28)$$

$$P_{\text{дв.}} \rightarrow \min, \quad (29)$$

$$P_{\text{дв.}} \leq 1.1 \cdot P_{\text{дв. доп.}}, \quad (30)$$

где $P_{\text{дв. доп.}}$ — допустимое значение мощности (~ 1 кВт на 1 м³ рабочего объема).

Перед исследованием с использованием алгоритма, основанного на применении метода перебора, необходимо выбрать шаг перебора значений параметров D_m и n . Результаты тестовых расчетов для различных значений этих параметров приведены в табл. 1 и табл. 2.

По результатам расчетов, приведенным в табл. 1, выбрано значение шага перебора параметра n , равное 30 об/мин, т.к. в этом случае разница между последующим и предыдущим значениями критерия K_{SVS} не превысит 20 %, что удовлетворяет принятым требова-

ниям к точности решения рассматриваемой задачи. Другими словами, рекомендуется проводить 7 расчетов с шагом 30 об/мин: 150, 180, 210, 240, 270, 300 и 330 об/мин, а так же еще один расчет для верхней границы рассматриваемой области (350 об/мин). В результате расчет производится в 8 точках (31).

Таким же образом, на основании результатов расчетов, приведенных в табл. 2, шаг перебора параметра D_m выбран равным 0,01 м. т. е. для диаметра мешалки будет проведен расчет в 4 точках (32): 0,11; 0,12; 0,13 и 0,14 м.

Таблица 1. Результаты расчетов частоты вращения мешалки при фиксированном значении ее диаметра

[Table 1. The results of calculations of the rotation speed at a fixed value of the diameter of the stirrers]

№ п/п	Частота вращения мешалки n , об/мин	Диаметр мешалки D_m , м	Значение суммарного вектора скорости K_{SVS} , м/с
1	150	0,14	62186
2	160		64765
3	170		69172
4	180		74761
5	190		75005
6	200		76232
7	210		81380
8	220		84003
9	230		87313
10	240		94971
11	250		98845
12	260		100535
13	270		103569
14	280		108366
15	290		108506
16	300		117755
17	310		121992
18	320		122966
19	330		129849
20	340		131585
21	350		134846

Как видно, использование алгоритма основанного на методе перебора, см. рис. 2, потребует реализации 32 расчетов (33), на каждый из которых в среднем затрачивается 2 часа машинного времени, т. е. на решение задачи затрачивается порядка 65 часов.

$$i = 8, \quad (31)$$

$$j = 4, \quad (32)$$

$$i \cdot j = 32. \quad (33)$$

Отметим, что применение метода перебора дает возможность нахождения глобального экстремума целевой функции при обоснованном выборе диапазонов рассматриваемых значений параметров задачи и величины шага перебора значений каждого из параметров.

Таблица 2. Результаты расчетов диаметра мешалки при фиксированном значении скорости вращения

[Table 2. Results of calculations of the diameter of the stirrer at a fixed value of the rotation speed]

№ п/п	Частота вращения мешалки n , об/мин	Диаметр мешалки D_m , м	Значение суммарного вектора скорости K_{SVS} , м/с
1	250	0,110	59 273
2		0,115	65 026
3		0,120	69 734
4		0,125	75 272
5		0,130	82 041
6		0,135	92 123
7		0,140	98845

Однако применение этого подхода при повышенных требованиях к точности решения может потребовать весьма значительных затрат времени: при использовании стандартного ПК поиск экстремума критерия (28) для реального объекта может занять в среднем 15–20 суток. Эта проблема решается использованием мощного ПК или удалённых дата-центров, но оба этих варианта ускорения расчетов требуют дополнительных, иногда значительных, финансовых затрат.

Представленный в исследовании алгоритм оптимизации (рис. 2), основанный на

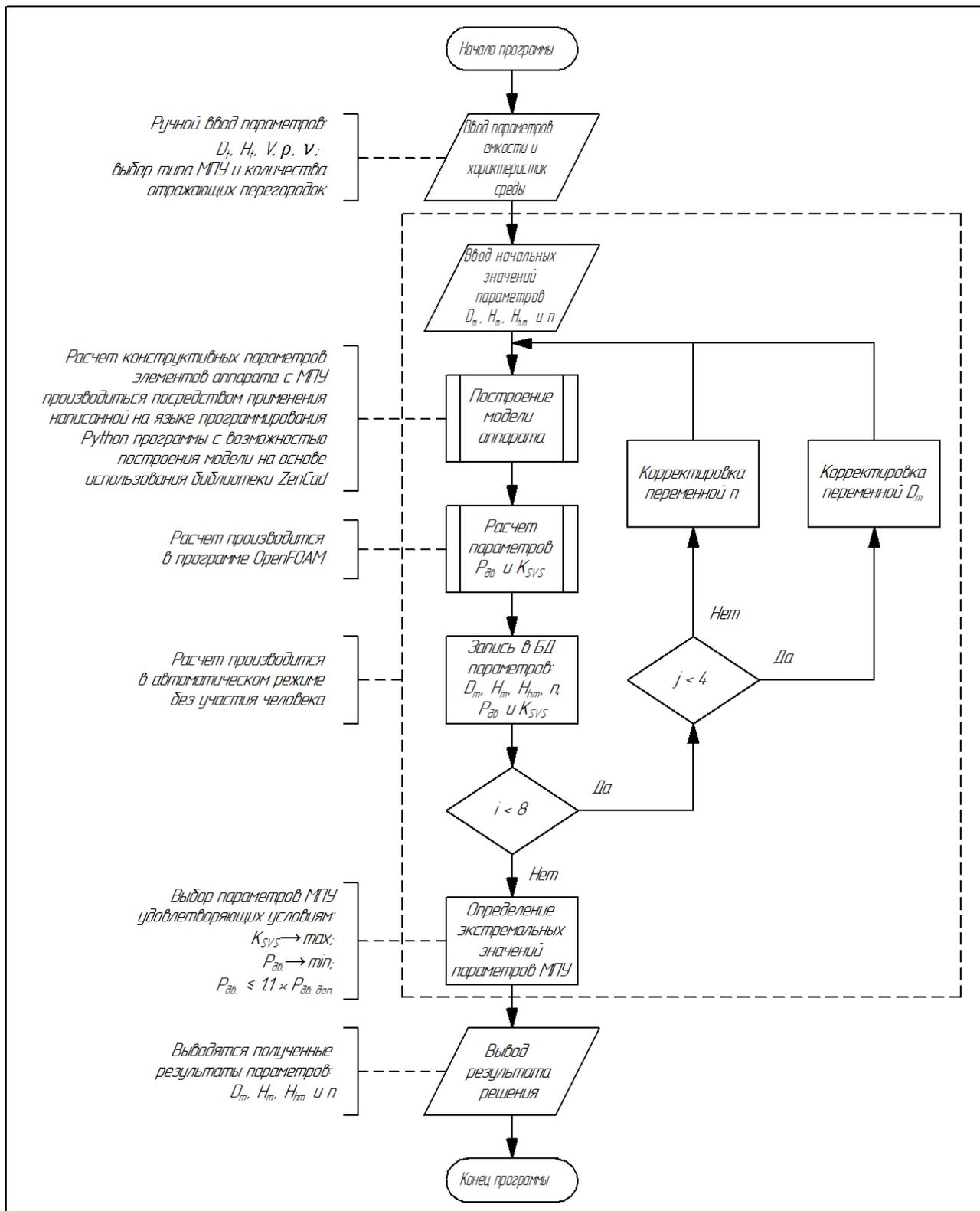


Рис. 2. Схема работы проблемно-ориентированной системы управления и оптимизации [Fig. 2. Scheme of operation of problem-oriented control and optimization system]

методе перебора, является неотъемлемой частью разработанной ранее системы по расчету конструктивных параметров и режимов функционирования МПУ, более подробное описание данной системы и ее ключевые особенности представлены в литературе [15]. Произвести достоверные сравнения представленной СУиО (1)–(30) с другими подобными системами не представляет возможности по причине того, что в аналогичных продуктах отсутствуют алгоритмы оптимизации как базовый инструмент, а так же в общедоступных источниках и сети интернет не было обнаружено СУиО МПУ или любого другого аналогичного продукта.

Предложенный алгоритм решения поставленной задачи и соответствующий алгоритм взаимодействия информационных потоков в СУиО применим и к задачам проектирования других технически сложных объектов, математическое описание которых включает системы дифференциальных уравнений с частными производными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере задачи оптимизации параметров открытой турбинной мешалки было проиллюстрировано применение разработанной СУиО для задач оптимизации сложных технических объектов и в частности для расчета конструктивных и режимных параметров аппаратов с МПУ.

Дальнейшее развитие данной тематики позволит создать прикладное программное обеспечение, которое повысит эффективность и качественные показатели выпускаемой продукции и оборудования, а также снизит финансовые затраты на действующих предприятиях.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брагинский, Л. Н. Перемешивание в жидких средах. Физические основы и инженерные методы расчета. / Л. Н. Брагинский, В. И. Бегачев, В. М. Барабаш – Л. : Химия, 1984. – 336 с.
2. Войтович, Р. Математическое моделирование гидродинамики смесителя с эксцентрически расположенной мешалкой / Р. Войтович, А. А. Липин, А. Г. Липин // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58, № 11. – С. 83–86.
3. Гарбарук, А. В. Лекции по течению вязкой жидкости и моделям турбулентности: методы расчета турбулентных течений / А. В. Гарбарук, Е. М. Смирнов. – СПб. : Изд-во Санкт-Петербургский государственный политехнический ун-та, 2010. – 127 с.
4. Донских, И. Н. Анализ программных средств моделирования сложных систем / И. Н. Донских, Е. А. Кискин, М. Ю. Кротов [и др.] // Информатика: проблемы, методология, технологии : Сборник материалов XIX международной научно-методической конференции, Воронеж, 14–15 февраля 2019 года / Под ред. Д.Н. Борисова. – Воронеж: Издательство «Научно-исследовательские публикации» (ООО «Вэлборн»), 2019. – С. 1098–1102.
5. Карпушкин, С. В. Расчеты и выбор механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, А. Б. Борисенко; М-во образования и науки Российской Федерации, ГОУ ВПО «Тамбовский гос. технический ун-т». – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2009. – 168 с.
6. Лащинский, А. А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры [Текст]: справочник / А. А. Лащинский, А. Р. Толчинский. – Изд. 4-е, стер. – Москва: Альянс, 2011. – 752 с.
7. Малыгин Е. Н. Математические методы в технических расчётах: учебное пособие / Е. Н. Малыгин. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 80 с.
8. Мартьянов, Е. И. Математическое описание полей скоростей в аппарате с мешал-

кой / Е. И. Мартьянов, Е. Н. Малыгин // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2020. – № 54. – С. 107–111. – DOI 10.36807/1998-9849-2020-54-80-107-111.

9. Мартьянов, Е. И. Повышение эффективности механического перемешивания в вертикальных емкостных аппаратах / Е. И. Мартьянов, С. В. Карпушкин // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: Материалы VII Международной научно-практической конференции, Тамбов, 12–14 октября 2021 года. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2021. – С. 44–48.

10. Мартьянов, Е. И. Проблемно-ориентированная система управления и оптимизации основных параметров технически сложных систем / Е. И. Мартьянов, С. В. Карпушкин, В. В. Алексеев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2021. – Т. 27, № 3. – С. 336–344. – DOI 10.17277/vestnik.2021.03.pp.336-344.

11. Минибаева, Л. Р. Численное моделирование гидродинамической структуры потока в аппаратах с перемешивающими устройствами / Л. Р. Минибаева, А. Г. Мухаметзянова, А. В. Клинов // Вестник Казанского технологического университета. – 2008. – № 6. – С. 191–198.

12. Морданов, С. В. Методика определения полезной мощности привода механического перемешивающего устройства / С. В. Морданов, С. Н. Сыромятников, А. П. Хомяков // Информационная школа молодого ученого: сборник научных трудов / ЦНБ УрО РАН; отв. ред. П. П. Трескова; сост. О. А. Оганова, Т. В. Пирожок. – Екатеринбург: Типография «Уральский центр академического обслуживания», 2011. – С. 254–264.

13. Adeyemi N., Mohiuddin A.K.M., Husaini M., Jameel A. T. Mixed-Flow Impeller Characteristics

in Baffled Mixing Tank. AMR. 2012. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.576.154>.

14. Edward L. Paul, Victor A. Atiemo-Obeng, Suzanne M. Kresta Handbook of industrial mixing. Science and practice. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc. 2004.

15. Martyanov, E. I. Development of software systems for the design of technically complex products / E. I. Martyanov, E. N. Malygin // Journal of Physics: Conference Series : Current Problems, Voronezh, 07–09 декабря 2020 года. – Voronezh, 2021. – P. 012122. – DOI 10.1088/1742-6596/1902/1/012122. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/351598897_Development_of_the_mathematical_model_of_the_force_actuator_for_deployment_of_large-sized_space_structures. Дата обращения: 28.03.2022.

16. Maximilian F. Eggl et al. Mixing by stirring: optimizing shapes and strategies, Physical Assessment Liquids. – 2022. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.7.073904

17. Mikito Konishi, Masanobu Inubushi, Susumu Goto. Fluid mixing optimization with reinforcement learning. Scientific Reports. – 2022. – 12 (1) DOI: 10.1038/s41598-022-18037-7

18. Ochieng A., Onyango M. CFD simulation of the hydrodynamics and mixing time in a stirred tank. Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly. – 2010. – 16(4). – P. 379–386. <https://doi.org/10.2298/ciceq100211040o>.

19. Shi L., Zhou S. J., Yang F. L., Hu F. J. Numerical Simulation of Turbulent Mixing for Dislocated Blades in a Stirred Tank. AMR. – 2011. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.354-355.559>.

20. Sumer B. M. Lecture notes on turbulence. Technical University of Denmark. – 2007.

21. Yakhot V., Orszag S. A., Thangam S., Gatski T. B., Speziale Yakhot C. G. Development of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion Technique // Phys. Fluids. – 1992. – Vol. 7. – P. 1510–1520.

Мартьянов Евгений Игоревич — аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (КИСМ) Тамбовского государственного технического университета (ТГТУ).

E-mail: martyanovei@gmail.com

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0360-2133>

Карпушкин Сергей Викторович — д-р техн. наук, проф., профессор кафедры КИСМ ТГТУ.

E-mail: karpushkin.sv@mail.tstu.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6886-0646>

Алексеев Владимир Витальевич — д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Информационные системы и защита информации» ТГТУ.

E-mail: vvalex1961@yandex.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-03984426>

DOI: <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2022/3/33-44>

ISSN 1995-5499

Received 04.07.2022

Accepted 30.09.2022

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF MECHANICAL MIXING DEVICES OF VERTICAL CAPACITIVE REACTORS

© 2022 E. I. Martyanov, S. V. Karpushkin, V. V. Alekseev✉

*Tambov State Technical University
106, Sovetskaya Street, 392000 Tambov, Russian Federation*

Annotation. The article presents the results of solving the problem of optimizing the operating and design parameters of mechanical mixing devices of vertical capacitive apparatuses using an algorithm, that guarantees an optimal solution to the problem with minimal time. The algorithm is developed on the basis of the brute force method implemented using the Python programming language and the SciPy library, which is designed to perform scientific and engineering calculations. A block diagram and a step-by-step implementation of the developed algorithm are presented. The evaluation of the performance was carried out by the example of solving the problem of determining the design and operating parameters of an open turbine agitator installed in a vertical capacitive apparatus with an elliptical bottom, which provide maximum mixing intensity.

Keywords: optimization algorithms, computational fluid dynamics, mechanical mixing devices, mixing intensity.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. *Braginski L. N.* (1984) Peremeshivanie v zhidkikh sredakh. Fizicheskie osnovy i inzh-

ernye metody rascheta [Stirring in fluid media. Physical basis and engineering methods of calculation.]. *L. : Chemistry.* P. 336 (in Russian).

2. *Voitovich R.* (2015) Matematicheskoe modelirovanie gidrodinamiki smesitelia s ekstsentricheski raspolozhennoi meshalkoi [Mathematical modeling of hydrodynamics of a mixer with an eccentrically located mixer]. *In: Proceedings of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology.* Vol. 11. P. 83–86 (in Russian).

✉ Alexeev Vladimir V.
e-mail: vvalex1961@yandex.ru

3. Garbaruk A. V. (2010) Lektsii po techeniiu viazkoi zhidkosti i modeliam turbulentnosti: metody rascheta turbulentnykh techenii [Lectures on viscous fluid flow and turbulence models: methods of calculation of turbulent flows]. *Saint-Petersburg : St. Petersburg State Polytechnical University Publisher*, P. 127 (in Russian).
4. Donskikh I. N. (2019) Analiz programnykh sredstv modelirovaniia slozhnykh sistem [Analysis of program means for modeling complex systems] *In: Informatics: problems, methodology, technology: collection of materials of XIX international scientific-methodical conference, Voronezh, 14–15 February 2019, Voronezh: Publishing house “Scientific-Research Publications”*. P. 1098–1102 (in Russian).
5. Karpushkin S. V. (2009) Raschety i vybor mekhanicheskikh peremeshivaiushchikh ustroystv vertikal’nykh emkostnykh apparatov [Calculations and selection of mechanical mixing devices of vertical reservoirs] *Ministry of Education and Science of the Russian Federation, GOU VPO “Tambov State Technical University. Tambov: Publishing house of TSTU*. P. 168 (in Russian).
6. Lashchinskii A. A. (2011) Osnovy konstruirovaniia i rascheta khimicheskoi apparatury [Fundamentals of construction and calculation of chemical equipment]. *Moscow : Alliance*. P. 752 (in Russian).
7. Malygin E. N. (2010) Matematicheskie metody v tekhnicheskikh raschetakh: uchebnoe posobie [Mathematical Methods in Technical Calculations: Tutorial]. *Tambov : GOU VPO TSTU*. P. 80 (in Russian).
8. Martyanov E. I. (2020) Matematicheskoe opisanie polei skorostei v apparate s meshalkoi [Mathematical description of velocity fields in a stirrer apparatus] *In: Proceedings of St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*. P. 107–111. DOI 10.36807/1998-9849-2020-54-80-107-111 (in Russian).
9. Martyanov E. I. (2021) Povyshenie effektivnosti mekhanicheskogo peremeshivaniia v vertikal’nykh emkostnykh apparatakh [Increase of efficacy of mechanical mixing in vertical reservoirs] *In: Virtual modeling, prototyping and industrial design: Proceedings of VII International Scientific-Practical Conference, Tambov, October 12–14, 2021, Tambov: Publishing Center of Tambov State Technical University*. P. 44–48 (in Russian).
10. Martyanov E. I. (2021) Problemno-orientirovannaya sistema upravleniya i optimizatsii osnovnykh parametrov tekhnicheskikh slozhnykh sistem [Problem-oriented system of control and optimization of the main parameters of technically complex systems] *In: Vestnik of Tambov State Technical University*. P. 336–344. DOI 10.17277/vestnik.2021.03.pp.336-344 (in Russian).
11. Minibaeva L. R. (2008) Chislennoe modelirovanie gidrodinamicheskoi struktury potoka v apparatakh s peremeshivaiushchimi ustroystvami [Numerical modeling of hydrodynamic flow structure in apparatuses with stirring devices] *In: Bulletin of Kazan Technological University*. P. 191–198 (in Russian).
12. Mordanov S. V. (2011) Metodika opredeleniia poleznoi moshchnosti privoda mekhanicheskogo peremeshivaiushchego ustroystva [Methods of determination of useful power of mechanical mixing device drive] *In: Information school of young scientist: collection of scientific works. Yekaterinburg: Urals Center for Academic Service Printing House*. P. 254–264 (in Russian).
13. Adeyemi N., Mohiuddin A.K.M., Husaini M. and Jameel A. T. (2012). Mixed-Flow Impeller Characteristics in Baffled Mixing Tank. *AMR*. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.576.154>.
14. Edward L. Paul, Victor A. Atiemo-Obeng and Suzanne M. Kresta (2004) Handbook of industrial mixing. Science and practice. *Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc*.
15. Martyanov E. I. and Malygin E. N. (2020) Development of software systems for the design of technically complex products. *Journal of Physics: Conference Series : Current Problems, Voronezh, 07–09 December 2020. Voronezh, 2021*. P. 012122. DOI 10.1088/1742-6596/1902/1/012122. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/351598897_Development_of_the_mathematical_model_of_the_force_actuator_for_deployment_of_large-sized_space_structures. Дата обращения: 28.03.2022.
16. Maximilian F. Eggl et al. (2022) Mixing by stirring: optimizing shapes and strategies, *Physical Assessment Liquids* DOI: 10.1103/PhysRevFluids.7.073904

17. Mikito Konishi, Masanobu Inubushi and Susumu Goto. (2022) Fluid mixing optimization with reinforcement learning. *Scientific Reports*; 12 (1) DOI: 10.1038/s41598-022-18037-7
18. Ochieng A. and Onyango M. (2010). CFD simulation of the hydrodynamics and mixing time in a stirred tank. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*. 16(4). P. 379–386. <https://doi.org/10.2298/ciceq100211040o>.
19. Shi L., Zhou S. J., Yang F. L. and Hu F. J. (2011). Numerical Simulation of Turbulent Mixing for Dislocated Blades in a Stirred Tank. *AMR*. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.354-355.559>.
20. Sumer B. M. (2007) Lecture notes on turbulence. *Technical University of Denmark*.
21. Yakhot V., Orszag S. A., Thangam S., Gatski T. B. and Speziale Yakhot C. G. (1992) Development of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion Technique. *Phys. Fluids*. Vol. 7. P. 1510–1520.

Martyanov Evgeny I. — PhD student of the department “Computer-integrated systems in mechanical engineering” of Tambov State Technical University.
E-mail: martyanovei@gmail.com
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0360-2133>

Karpushkin Sergey V. — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the department “Computer-integrated systems in mechanical engineering” of Tambov State Technical University.
E-mail: karpushkin.sv@mail.tstu.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6886-0646>

Alexeev Vladimir V. — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Information Systems and Information Protection Department, Tambov State Technical University.
E-mail: vvalex1961@yandex.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-03984426>