

М. Алдалло, С. И. Поникаров, А. С. Поникаров

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В АППАРАТАХ С ПЕРЕМЕШИВАЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

Ключевые слова: непрерывное перемешивание, моделирование, аппарат, ANSYS-CFX.

Данное исследование проведено с целью углубленного анализа процессов теплообмена в химических и теплообменных аппаратах, в которых используются перемешивающие устройства. Процесс перемешивания играет ключевую роль в различных индустриях, включая химическое производство, пищевую промышленность и многие другие. Перемешивание важно для равномерного распределения компонентов в реакторах, баках и аппаратах, что в свою очередь влияет на качество продукции и эффективность процессов. Теплообмен является критической составляющей в многих технологических процессах и играет важную роль в эффективности и энергосбережении в различных отраслях. Данное исследование началось с тщательного обзора литературы. Далее были проведены эксперименты, включающие в себя работу с различными типами аппаратов и перемешивающими устройствами, с разной интенсивностью перемешивания. Методом исследования выбраны цифровые прототипы задействованы программный пакет ANSYS. Целью данного исследования является анализ эффективности теплоотдачи в таких аппаратах, а также выявление факторов, влияющих на интенсивность теплообмена. Данное исследование рассматривает эти задачи: подогрев воды в аппарате с мешалкой, определение критической температуры и времени, для достижения стационарного режима в разных смесях. Исследование теплообмена в аппаратах с перемешивающим устройством является критическим элементом для оптимизации производственных процессов и повышения энергоэффективности. Согласно расчетам, отмечается более быстрое достижение стационарного режима, что свидетельствует о более эффективном нагреве жидкости при использовании турбинной мешалки. Математические расчеты подтверждают, что при перемешивании смеси воды с глицерином, по сравнению с перемешиванием чистой воды, происходит замедленный и менее эффективный процесс нагрева, обусловленный более высокой вязкостью глицерина. Это исследование служит важным вкладом в область теплообмена и предоставляет ценные рекомендации для дальнейших разработок и применений.

M. Aldallo, S. I. Ponikarov, A. S. Ponikarov

STUDY OF HEAT TRANSFER IN APPARATUSES WITH A MIXING DEVICE

Keywords: continuous mixing, modeling, apparatus, ANSYS-CFX.

This study was carried out with the aim of in-depth analysis of heat transfer processes in chemical and heat apparatuses that use mixing devices. The mixing process plays a key role in various industries, including chemical production, food processing and many others. Mixing is important for uniform distribution of components in reactors, tanks and apparatus, which in turn affects product quality and process efficiency. Heat exchange is a vital element in numerous technological processes and holds a significant role in enhancing efficiency and conserving energy across various industries. This study began with a thorough review of the literature. Further experiments were carried out, including work with different types of apparatuses and stirring devices, with different stirring intensity. Digital prototypes were chosen as the method of research and the ANSYS software package was used. The purpose of this study is to analyze the efficiency of heat transfer in such apparatuses, as well as to identify the factors affecting the intensity of heat transfer. This study addresses following problems: heating water in an apparatus with a stirrer, determining the critical temperature and time to reach steady-state in different mixtures. The study of heat transfer in apparatus with a mixing device is a critical element for optimizing production processes and increasing energy efficiency. According to calculations, faster achievement of the steady-state regime is observed, which indicates more efficient heating of the liquid when using a turbine stirrer. Mathematical calculations confirm that when stirring a mixture of water and glycerin, compared to stirring pure water, a slower and less efficient heating process occurs, due to the higher viscosity of glycerin. This study serves as an important contribution to the field of heat transfer and provides valuable guidelines for further developments and applications.

В области химической промышленности активно используются аппараты с механическим перемешиванием для обработки жидких сред и проведения весьма разнородных технологических процессов, таких как кристаллизация, абсорбция, экстрагирование, гомогенные и гетерогенные химические реакции и т. д. [1,2].

Эффективность; интенсивность; мощность, время перемешивания; степень однородности и другие параметры являются основными параметрами, характеризующими процесс перемешивания [3].

Перемешивающие устройства состоят из вращающийся мешалки, в вертикальных устройствах она может быть установлена снизу для уменьшения длины

вала и обеспечения механической устойчивости, может иметь боковой вход в больших устройствах или вставляться сверху под углом в небольших устройствах [4]. Импеллеры, используемые в лопастных и турбулентных мешалках, разделяются на различные общие классы в зависимости от структуры течения и геометрии:

1. Осевой поток: Импеллер в форме лопастного винта; импеллер с особыми скошенными лопатками; гидрофильный импеллер.
2. Радиальный поток: Плоско-лопаточный импеллер; импеллер Раштона; импеллер с полыми лопатками [5,6].

Все импеллеры генерируют определенную структуру течения. На результат процесса смешивания

сильно влияет режим течения импеллера. В больших ёмкостях, в которых используются мешалки по осевому потоку, струйное течение может вызвать завихрение на поверхности. Такое завихрение может снизить эффективность смешивания и, возможно, привести к вовлечению воздуха в жидкую смесь, поэтому важно менять положение импеллеров. Для эффективного смешивания жидкостей импеллеры с осевым потоком обеспечивают радиальные потоки, если их разместить вблизи дна ёмкости [7,8].

Во многих исследованиях особое внимание уделяется изучению теплообмена в области перемешивания жидких сред с целью улучшения существующих устройств.

Следовательно, есть два пути для интенсификации теплообмена: либо увеличивая скорость вращения мешалки, либо расширяя поверхность для теплообмена [9-12].

Данные и цель работы

Целью данного исследования является сравнение эффективности нагрева при перемешивании различными типами мешалок. Для достижения цели данного исследования, необходимо решать следующие задачи:

1. Подогреть воды в аппарате с мешалкой, периодически включаемой.
2. Определить критическую температуру, при которой устанавливается стационарный режим работы аппарата с мешалкой непрерывного действия, и время, необходимое для достижения этого режима.
3. Определить температуру, при которой аппарат переходит в стационарный режим работы при нагреве смеси воды и глицерина с использованием непрерывного перемешивания.

Экспериментальная часть

Методом исследования выбраны цифровые прототипы, задействованы программный пакет ANSYS. В данном исследовании спроектировано 2 геометрические модели аппарата с перемешивающим устройством, с турбинной мешалки и с лопастной мешалки, с помощью модуль Design Modeler. Численный анализ мешалки с использованием коммерческого программного обеспечения ANSYS-CFX. Количество сеток влияет на скорость и результат численных расчетов, поэтому нам необходимо изучить независимость сеток. Перед моделированием нам следует найти подходящее количество элементов сетки для создания тепло-гидравлических характеристик для улавливания градиентов скорости и температуры, для этого нам следует выбрать тетраэдрический элемент сетки [12,13].

Выбираем среду, которая будет нагреваться в аппарате. В нашем случае это вода. Температура воды 293,15 К.

Для внутренней области с мешалкой задаём скорость вращения 110 об/мин.

На внешней области задаём дополнительную границу с температурой 363,15 К. Эта граница будет играть роль стенки, через которую теплота от теплоносителя передаётся объёму жидкости [14-16].

Для решения поставленных задач этого исследования необходимо провести ряд вычислений:

- Для начала проводим 5 вычислительных расчетов, устанавливая интервал времени 5 секунд и изменяя количество итераций в программе от 50 до 250 с шагом в 50 итераций для каждого расчета.

Проводим аналогичные вычисления, но используем лопастную мешалку вместо ранее выбранного типа.

- В последующем выполняем 4 вычислительных расчета, однако перед началом расчета требуется назначить новые граничные условия.

В модуле, предназначенном для создания геометрии, вводим два цилиндрических элемента, которые будут действовать в качестве ввода и вывода воды из аппарата.

Внесенные изменения в граничные условия – скорость воды на входе и выходе из аппарата. Эти значения меняются в пределах от 1 до 0,25 м/с в каждом расчете с шагом в 0,25 м/с. Делаем схожие расчеты, но меняем тип мешалки на лопастную.

- Далее выполняем такие же 4 расчета, но перед началом необходимо задать новые условия, вводим глицерин в воду. Содержание глицерина составляет 50% массы. Делаем аналогичные расчеты, но меняем тип мешалки на лопастную.

Результаты и обсуждение

Результаты расчетов и их аналогичных (с лопастной мешалки) с количеством итераций от 50 до 250 с шагом в 50 итераций показаны в таб. 1. Изменение температуры иллюстрировано на рис. 1.

Таблица 1 - Результаты первого вычислительного расчета

Table 1 – Results of the first computational calculation

Время нагрева, с	Средняя температура воды, к	
	Т. мешалка	Л. мешалка
250	322,34	316,89
500	337,53	330,59
750	346,84	339,91
1000	352,87	346,46
1250	356,68	351,27

По результатам проведенных расчетов можно сформулировать несколько заключений:

- При использовании турбинной мешалки в сравнении с лопастной мешалкой отмечается более эффективное повышение температуры жидкости;
- С течением времени скорость нагрева воды замедляется в связи с уменьшением разницы в температуре.

Результаты расчетов и их аналогичных (с лопастной мешалки) при введении два цилиндрических элемента для ввода и вывода воды показаны в таб. 2.

Исходя из выполненных вычислений, можно сформулировать несколько выводов.

1. При одинаковой скорости потока воды средняя температура в стационарном режиме работы аппарата с турбинной мешалкой превосходит аналогичный аппарат с лопастной мешалкой, а также быстрее достигается стационарный режим.

Следовательно, при использовании турбинной мешалки наблюдается более эффективное повышение температуры жидкости.

2. Уменьшение скорости потока воды на входе и выходе из аппарата приводит к повышению средней температуры в стационарном режиме работы аппарата, а, следовательно, увеличивается время достижения аппаратом стационарного режима. Рис. 2 демонстрирует изменение температуры.

Расчетные результаты и их сопоставимые (по лопастной мешалке) в глицериново-водной среде с изменением скорости потока воды показаны в таб. 3.

Таблица 2 - Результаты второго вычислительного расчета

Table 2 – Results of the second computational calculation

$v, \text{ м/с}$		1	0,75	0,50	0,25
Т. мешалка	$T_{\text{ср,к}}$	323,6	328,6	335,6	345,6
	$\tau_{\text{с}}, \text{ с}$	1000	1200	1500	1900
Л. мешалка	$T_{\text{ср,к}}$	319,1	323,6	330,6	341,6
	$\tau_{\text{с}}, \text{ с}$	1250	1375	1700	2200

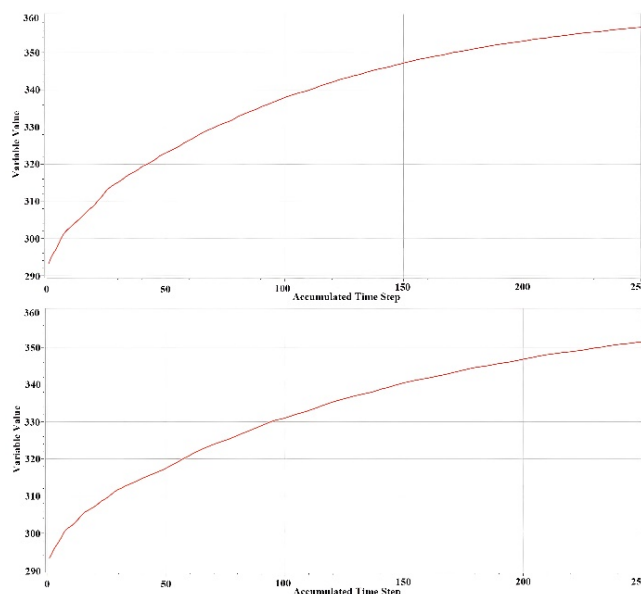


Рис. 1 – График изменения температуры в мешалках (турбинной и лопастной).

Fig. 1 – Graph of temperature change in stirrers (turbine and vane).

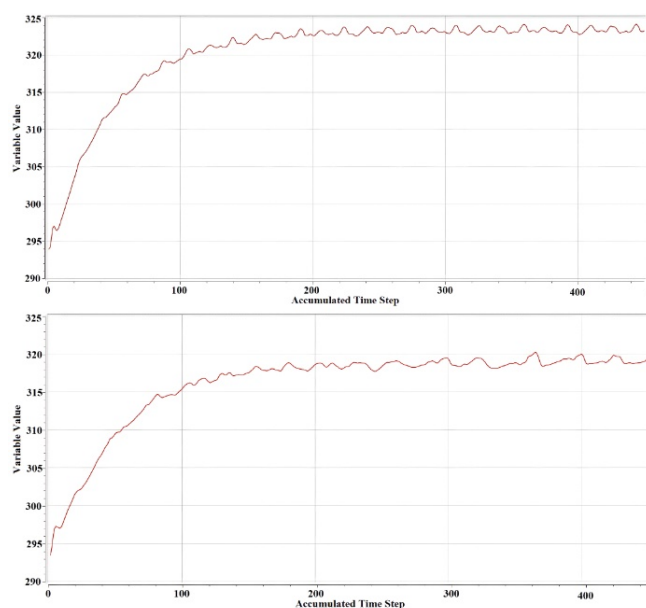


Рис. 2 – График изменения температуры в мешалках при введении двух цилиндрических элементов

Fig. 2 – Graph of temperature change in the stirrers when two cylindrical elements are introduced

По результатам проведенных расчетов, можно сформулировать ряд заключений:

1. При одной и той же скорости потока смеси средняя температура в аппарате с турбинной мешалкой превосходит температуру в аппарате с лопастной мешалкой, и также наблюдается более быстрое достижение стационарного режима, следовательно, использование турбинной мешалки обеспечивает более эффективное нагревание смеси.

2. При снижении скорости потока смеси на входе и выходе из аппарата средняя температура в стационарном режиме работы аппарата возрастает, и, как следствие, увеличивается время достижения аппаратом стационарного режима (рис. 3).

Таблица 3 - Результаты третьего вычислительного расчета

Table 3 – Results of the third computational calculation

$v, \text{ м/с}$		1	0,75	0,50	0,25
Т. мешалка	$T_{\text{ср}}, \text{ К}$	307,8	311,1	316,6	328,1
	$\tau_{\text{с}}, \text{ с}$	1700	1800	2200	3150
Л. мешалка	$T_{\text{ср}}, \text{ К}$	305,1	308,1	313,1	323,6
	$\tau_{\text{с}}, \text{ с}$	1725	1850	2300	3300

3. При смешивании глицериново-водной смеси по сравнению с чистой водой, наблюдается значительно менее эффективный и более медленный процесс нагрева, что связано с более высокой вязкостью глицерина.

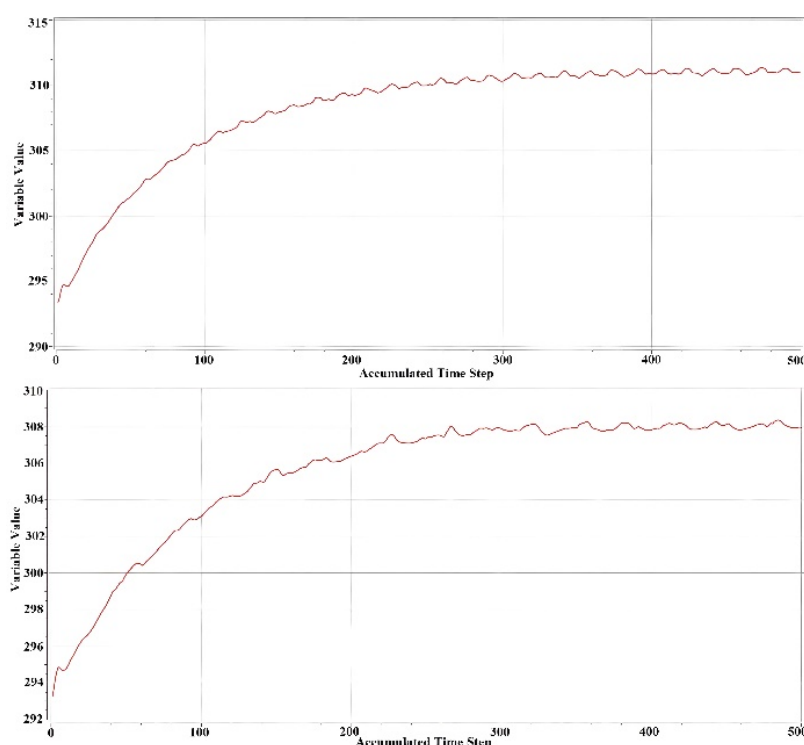


Рис. 3 - График изменения температуры в мешалках (при глицериново-водной среде)

Fig. 3 – Graph of temperature change in stirrers (with glycerine-water medium)

В результате расчетов еще были получены векторные линии скорости (рис. 4). Из этих результатов можно сделать следующие выводы:

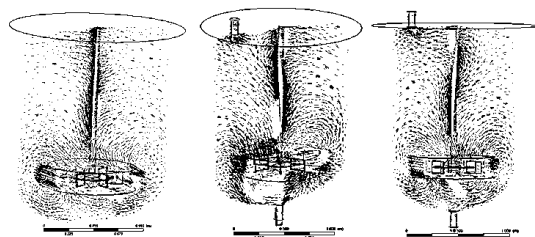


Рис. 4 - Векторные линии скорости расчетов

Fig. 4 – Vector lines of calculation rate

1. Определить направление движения среды внутри аппарата из векторных линий, и понять, как перемешивание происходит внутри устройства.

2. Более плотные и сложные линии могут дать вывод на более интенсивное перемешивание.

3. Показывают области замедления и образования завихрений в потоке.

4. И конечно, из анализа линий можно определить, сколько времени требуется для достижения стационарного режима в процессе перемешивания.

В результате расчетов также представлен контур турбулентной кинетической энергии (рис. 5), из контура можно получить следующие выводы:

- оценка уровня турбулентности в системе, где более высокие значения указывают на более интенсивные турбулентные явления.

- выявление областей в системе, где турбулентность более выражена, и определение характер вихри или области замедления.

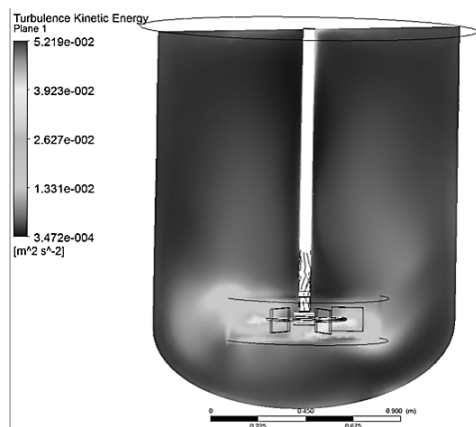


Рис. 5 - Контур турбулентной кинетической энергии

Fig. 5 – Turbulent kinetic energy contour

5. Анализ может дать представление о том, как изменение параметров, влияет на уровень турбулентности.

Выводы

Использование современных компьютерных решений позволяет добиваться выдающихся практических и экономических результатов в разных отраслях промышленности.

В рамках этого исследования мы воспользовались возможностями и методологией программного пакета ANSYS с целью разработки цифровых прототипов устройств с механическими перемешивающими устройствами, и провели моделирование нескольких задач для оценки и сопоставления эффективности различных типов мешалок.

По результатам проведённых расчетов мы сформулировали следующие выводы:

При сохранении одинаковой скорости потока жидкости средняя температура стационарного режима работы аппарата с турбинной мешалкой превышает температуру аппарата с лопастной мешалкой, и также отмечается более быстрое достижение стационарного режима, что указывает на более эффективный нагрев жидкости при применении турбинной мешалки.

Снижение скорости потока жидкости на входе и выходе из аппарата сопровождается увеличением средней температуры в стационарном режиме работы аппарата, и, следовательно, увеличением времени, необходимого для достижения стационарного режима.

Проведенные исследования и расчеты доказали, что при перемешивании смеси воды с глицерином по сравнению с перемешиванием чистой воды происходит замедленный и менее эффективный нагрев, что объясняется более высокой вязкостью глицерина.

Литература

1. Л.Н. Брагинский, В.И. Бегачев, В.М. Барабаш, *Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета*. Химия, Ленинград, 1984. 333 с.
2. Ф. Стренк, *Перемешивание и аппараты с мешалками*. Химия, Ленинград, 1975. 384 с.
3. М.Б. Генералов, В.П. Александров, В.В. Алексеев и др. *Машиностроение. Энциклопедия/Том IV-12 Машины и аппараты химических и нефтехимических производств*. Машиностроение. Москва. 2004. 832 с.
4. D. S. Dickey, *Mixing Equipment (Impeller Type)*. AIChE Equipment Testing Procedure, New York. 2001. 144 p.
5. G. B. Tatterson, *Fluid Mixing and Gas Dispersion in Agitated Tanks*. McGraw-Hill, New York. 1991. 548 p.
6. J. Y. Oldshue, *Fluid Mixing Technology*. McGraw-Hill, New York. 1983. 574 p.
7. X. F. McConville, B. S. Kessler, *In book: Chemical Engineering in the Pharmaceutical, Scale-up of mixing processes: a primer*. Impact Technology Development, Lincoln, MA, 2019. pp. 241-259.
8. G. B. Tatterson, *Scaleup and Design of Industrial Mixing Processes*. McGraw-Hill, New York, 1994. 312 p.
9. E. L. Paul, V. A. Atiemo-Obeng, S. M. Kresta, *Handbook of industrial mixing: science and practice*. Sponsored by the North American Mixing Forum, USA, 2004. 1440 p.
10. A. Ebrahimi, M. Bandari, M. Parvari, *Iranian Journal of Chemical Engineering*. 3, 6, 71-87 (2009).
11. P. Mohan, A.N. Emery, T. Al-Hassan, *Experimental Thermal and Fluid Science*. 6, 5, 861-883, (1992).
12. G.G. Stephens, M.R. Mackley, *Experimental Thermal and Fluid Science*. 25, 583-594, (2002).
13. Р. М. Фаттахаев, А. А. Назаров, С. И. Поникаров. *Вестник Казанского технологического университета*. 17, 11, 106-107, (2014).
14. E. S. Telyakov, A. S. Ponikarov, L. E. Osipova. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 52, 1, 11-23, (2018).
15. В. А. Алексеев, С. И. Валеев, С. А. Вилохин, П. В. Вилохина, А. Д. Галеев, М. А. Зотов, А. С. Поникаров, С. И. Поникаров, М. Х. Сабитов, А. А. Салин, Е. В. Старовойтова, Э. Ш. Теляков, А. А. Хоменко. *Некоторые аспекты обеспечения промышленной безопасности опасных объектов. Имитационное моделирование*. Казанский национальный исследовательский технологический университет. Казань, 2020. 128 с.
16. Пат. Российская Федерация 2019614130 (2019).

References

1. L.N. Braginsky, V.I. Begachev, V.M. Barabash, *Mixing in liquid media: Physical foundations and engineering methods of calculation*. Chemistry, Leningrad, 1984. 333 p.
2. F. Strenk, *Stirring and apparatus with stirrers*. Chemistry, Leningrad, 1975. 384 p.
3. M.B. Generalov, V.P. Alexandrov, V.V. Alekseev and others. *Mechanical engineering. Encyclopedia/Volume IV-12 Machines and apparatus for chemical and petrochemical production*. Mechanical engineering. Moscow. 2004. 832 p.
4. D. S. Dickey, *Mixing Equipment (Impeller Type)*. AIChE Equipment Testing Procedure, New York. 2001. 144 p.
5. G. B. Tatterson, *Fluid Mixing and Gas Dispersion in Agitated Tanks*. McGraw-Hill, New York. 1991. 548 p.
6. J. Y. Oldshue, *Fluid Mixing Technology*. McGraw-Hill, New York. 1983. 574 p.
7. X. F. McConville, B. S. Kessler, *In book: Chemical Engineering in the Pharmaceutical, Scale-up of mixing processes: a primer*. Impact Technology Development, Lincoln, MA, 2019. pp. 241-259.
8. G. B. Tatterson, *Scaleup and Design of Industrial Mixing Processes*. McGraw-Hill, New York, 1994. 312 p.

9. E. L. Paul, V. A. Atiemo-Obeng, S. M. Kresta, *Handbook of industrial mixing: science and practice*. Sponsored by the North American Mixing Forum, USA, 2004. 1440 p.
10. A. Ebrahimi, M. Bandari, M. Parvari, *Iranian Journal of Chemical Engineering*. 3, 6, 71-87 (2009).
11. P. Mohan, A.N. Emery, T. Al-Hassan, *Experimental Thermal and Fluid Science*. 6, 5, 861-883, (1992).
12. G. G. Stephens, M. R. Mackley, *Experimental Thermal and Fluid Science*. 25, 583-594, (2002).
13. R. M. Fattakhaev, A. A. Nazarov, S. I. Ponikarov. *Herald of Kazan Technological University*. 17, 11, 106-107, (2014).
14. E. S. Telyakov, A. S. Ponikarov, L. E. Osipova. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 52, 1, 11-23, (2018).
15. V. A. Alekseev, S. I. Valeev, S. A. Vilokhin, P. V. Vilokhina, A. D. Galeev, M. A. Zotov, A. S. Ponikarov, S. I. Ponikarov, M. Kh. Sabitov, A. A. Salin, E. V. Starovoitova, E. Sh. Telyakov, A. A. Khomenko. *Some aspects of ensuring industrial safety of hazardous facilities. Simulation modeling*. Kazan National Research Technological University. Kazan, 2020. 128 p.
16. Pat. Russian Federation 2019614130 (2019).

© **М. Алдалло** - аспирант каф. машин и аппаратов химических производств КНИТУ, maldallo@mail.ru; **С. И. Поникаров** - д-р техн. наук, проф. той же кафедры; **А. С. Поникаров** - канд. техн. наук, доц. той же кафедры.

© **М. Aldallo** – PhD-student, Department of Machines and Apparatuses of Chemical Production (MACP), Kazan National Research Technological University (KNRTU), mail: maldallo@mail.ru; **S. I. Ponikarov** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, the MACP department, KNRTU; **A. S. Ponikarov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, the MACP department, KNRTU.