

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОМАСЛЯНОЙ ЭМУЛЬСИИ
ПРИ ТРЕХ РЕЖИМНЫХ ОБОРОТАХ РОТОРНО-КАВИТАЦИОННОГО
ДИСПЕРГАТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА
Цымбалов А.С., Ларина А.И., Блиничев В.Н.**

Цымбалов Андрей Сергеевич, Ларина Анастасия Игоревна, Блиничев Валерьян Николаевич
Ивановский государственный химико-технологический университет,
г. Иваново, Россия. 153000, Ивановская область, г. Иваново, пр. Шереметевский, 7.
E-mail: andrey180494@list.ru, Nastyushka300495@yandex.ru, blinich@isuct.ru

В данной статье представлены основные результаты исследования процесса получения стабильной, высокодисперсной, водомасляной эмульсии при различных оборотах роторно-кавитационного диспергатора. Представлены дисперсные характеристики получаемой эмульсии при различных циклах нагружения в диспергаторе и разных ПАВ. Показано, что с увеличением числа нагружения происходит повышение температуры получаемой эмульсии и уменьшение её устойчивости. Поэтому основные исследования проводились с подключением теплообменника, охлаждение эмульсии в котором между циклами существенно повысило устойчивость получаемой эмульсии. В заключение статьи рассмотрена кинетика устойчивости и гранулометрический состав капель масла. Показано, что наибольшее влияние на уменьшение размеров капель масла эмульсии оказывает увеличение числа оборотов ротора от 3000 до 6000 об/мин, а затем число циклов нагружения. Предложено эмпирическое уравнение для описания кинетики устойчивости эмульсии в системе масло в воде.

Ключевые слова: эмульсия, теплообменник, диспергирование, цикловое нагружение.

**RESEARCH OF WATER-OIL EMULSION AT THREE REGIME ROTATIONS OF
ROTARY-CAVITATION DISPERSANT WITH THE APPLICATION OF A HEAT EXCHANGER
Tsymbalov A.S., Larina A.I., Blinichev V.N.**

Tsymbalov Andrey Sergeevich, Larina Anastasia Igorevna, Blinichev Valeryan Nikolaevich
Ivanovo State University of Chemical Technology,
Ivanovo, Russia. 153000, Ivanovo region, Ivanovo, Sheremetevsky ave., 7.
E-mail: andrey180494@list.ru, Nastyushka300495@yandex.ru, blinich@isuct.ru

This article presents the main results of the study of the process of obtaining a stable, highly dispersed, water-oil emulsion at various revolutions of the rotary cavitation-dispersant. The dispersion characteristics of the resulting emulsion at different loading cycles in the dispersant and different surfactants are presented. It is shown that with an increase in the number of loads, the temperature of the resulting emulsion increases and its stability decreases. Therefore, the main studies were carried out with the connection of a heat exchanger, the cooling of the emulsion in which between cycles significantly increased the stability of the resulting emulsion. In conclusion, the stability kinetics and the granulometric composition of oil droplets are considered. It is shown that the greatest influence on the reduction in the size of oil droplets and the stability of the emulsion is exerted by an increase in the number of rotations of the rotor from 3000 to 6000 rpm, and then the number of loading cycles. An empirical equation for the description of the kinetics of emulsifiers in the oil-in-water system is proposed.

Keywords: emulsion, heat exchanger, dispersion, cyclic loading.

Эмульсии – это тип гетерогенных систем, образованные двумя и большим числом фаз, которые взаимонерастворимы друг в друге, при этом одна фаза диспергируется в виде маленьких капель в другой [1-2]. В настоящее время представляет большой интерес применение эмульсий в различных областях отраслевой промышленности, таких как: пищевая, косметическая, фармацевтическая, химическая, нефтехимическая, металлургическая (в качестве смазочно-охлаждающих жидкостей) [3-4].

В наши дни требуются разработки современных технологий для получения устойчивых, высокодисперсных эмульсий. В текущий момент эмульсии, как правило, исследуют на установках периодического действия, при долговременном механическом влиянии на дисперсные системы. Данный процесс довольно затратный и невыгодный в связи с небольшой эффективностью. Поэтому в данной работе ставятся цели по созданию методов получения устойчивой эмульсии при минимальных расходах энергии [1].

В качестве основных, эффективных методов для образования таких дисперсных систем были предложены: внедрение в эмульсии эмульгаторов (поверхностно-активных веществ), механическое диспергирование с многоцикловым нагружением при помощи роторно-кавитационного диспергатора с охлаждением между циклами в кожухотрубном теплообменнике.

Методика циклового нагружения заключается в том, что после каждого проведенного опыта, эмульсия из роторно-кавитационного диспергатора направлялась обратно в емкость исходного продукта и снова подвергалась диспергированию в активаторе [5]

Первоначально исследования процесса эмульгирования с использованием метода циклового нагружения (1, 5, 10 циклов) проводились при числе оборотов роторно-кавитационной машины (6000 об/мин) с двумя видами ПАВ (ЭПЛ-1 и СК-2) без использования теплообменников [5-6]. ПАВ ЭПЛ-1 – экологически безопасный биоразлагаемый анионный эмульгатор, поверхностно-активное вещество для высокодисперсной эмульсионной полимеризации. Эмульгатор СК-2 – соль эфира сульфоянтарной кислоты, анионоактивный ПАВ [4].

В ранее проведенных исследованиях было установлено, что при повышении числа циклов нагружения температура дисперсной системы возрастает, что приводит к интенсификации процесса коалесценции, которая отрицательно влияет на стабильность эмульсии. При использовании эмульгатора ЭПЛ-1 дисперсность и устойчивость водомасляных эмульсий выше, чем при эмульгаторе СК-2 [7-8]. Поэтому для стабилизации температуры в установку был включен теплообменник.

Необходимо отметить, что применяемый нами роторно-кавитационный диспергатор является машиной непрерывного действия, в которой время пребывания обрабатываемой суспензии является переменной величиной и зависит от числа оборотов ротора. При увеличении числа оборотов ротора растут касательные напряжения сдвига, увеличивается число схлопывающихся кавитационных пузырьков, а время пребывания падает, так как растет производительность по жидкой гетерогенной системе. Расчет реального времени пребывания эмульсии, например, при числе оборотов ротора, равном 6000 об/мин составляет всего 0,15 сек, поэтому была проведена серия исследований при пропускании эмульсии несколько раз через диспергатор. В статье приводятся данные по дисперсионному составу эмульсии, её устойчивости к разделению при нагружении в 1, 5 и 10 циклов при разных эмульгаторах и различных числах оборотов ротора диспергатора. На рис. 1. представлена зависимость температуры эмульсии от числа циклов при 3-х оборотах ротора диспергатора. Из данного рисунка наглядно видно, что температура эмульсии растет как с увеличением числа циклов нагружения эмульсии, так и с повышением числа оборотов ротора диспергатора, что согласуется со всеми законами трансформации механической энергии в тепловую.

Гранулометрический состав измеряли на приборе Analysette-22 через час, сутки, двое суток получения эмульсии для определения не только распределения диаметров капель по размерам, а также устойчивости эмульсии. Для анализа устойчивости после всех опытов наливались мерные мензурки с делениями, которые позволяли точно во времени определять процент расслоившейся эмульсии, т.е. концентрацию масла в воде. Начальная концентрация масла, дозируемая в воду насосом, составляла 3%.

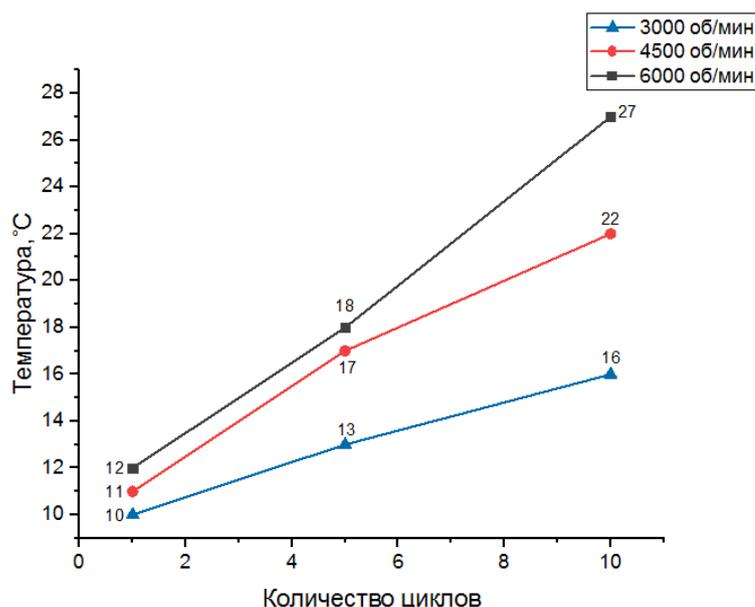


Рис. 1. Зависимость температуры эмульсии от числа циклов нагружения при 3-х оборотах ротора

Fig. 1. Dependence of the emulsion temperature on the number of loading cycles at 3 rotor revolutions

В ходе работы был подробно изучен гранулометрический состав капель эмульсии при использовании эмульгатора ЭПЛ-1 с применением циклового нагружения. Диаметр капель измерялся после проделанного опыта спустя 1 час, 24 и 48 часов. Исследования проводились с 1-им кожухотрубным теплообменником в роторно-кавитационной установке. Число оборотов ротора в диспергаторе – 3000, 4500 и 6000 об/мин.

На рис. 2. представлена зависимость среднего диаметра капель в эмульсии от числа оборотов ротора и количества циклов нагружения: а) через 1 час после её получения, б) через 24 часа, в) через 48 часов.

Анализируя данные, представленные на рис.2., необходимо отметить, что на средний размер капель эмульсии существенно влияет число оборотов ротора диспергатора и число циклов нагружения. Особенно интересно проанализировать величины среднего диаметра свежей эмульсии, через 1 час после её получения (рис. 2а.).

Увеличение числа оборотов при всех циклах нагружения приводит к уменьшению среднего диаметра капель. Например, при пяти циклах нагружения имеем следующие средние размеры капель: при $n=3000$ об/мин - $d=10,5$ мкм; $n=4500$ об/мин - $d=4,9$ мкм; $n=6000$ об/мин - $d=2,9$ мкм.

В то же время необходимо отметить, что сравнивая средние диаметры капель масла после пяти и десяти циклах нагружения значения практически не отличаются друг от друга и лежат в пределах погрешности их определения. Отсюда следует вывод о нецелесообразности увеличения числа циклов нагружения более 5, тем более, что устойчивость эмульсии после 10-ти циклов нагружения практически такая же, как и после 5-ти циклов.

Спустя 24 часа (рис. 2б.) при 3000 об/мин на первом цикле наблюдается резкое повышение средних размеров капель эмульсий М/В. Средний диаметр частиц вырос с 19 до 48 мкм.

Увеличение среднего диаметра после 24 часов получения эмульсии свидетельствует о начавшемся интенсивном процессе коагуляции и флокуляции капель, который продолжался и в следующие сутки (см. рис. 2в.).

Коагуляция и флокуляция начинает интенсифицироваться в связи с тем, что со временем действие эмульгаторов ослабевает и пленка, образованная на поверхности капель частиц при помощи ПАВ и защищающая от слияния капель в более крупные, становится менее прочной и разрушается, что приводит к столкновению малых частиц и образованию крупных агрегатов [1,2,7,9].

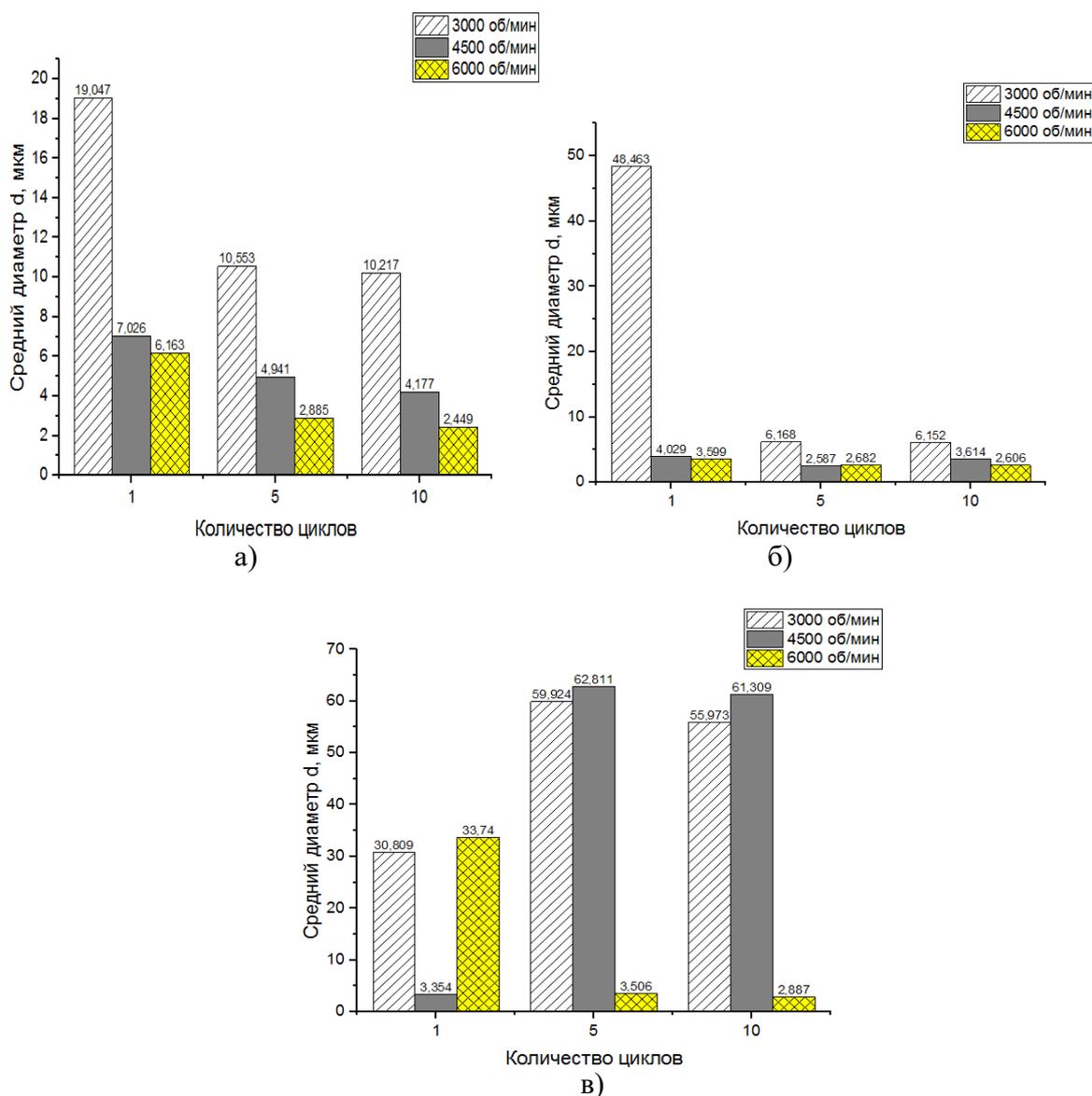


Рис. 2. Зависимость среднего размера диаметра капель от числа оборотов и циклов нагружения: а) спустя 1 час, б) спустя 24 часа, в) спустя 48 часов

Fig. 2. Dependence of the average size of the droplet diameter on the number of revolutions and loading cycles: a) after 1 hour, b) after 24 hours, c) after 48 hours

В ходе экспериментов было найдено, что наиболее устойчивые эмульсии получились при 6000 об/мин ротора диспергатора при 5 и 10 циклах нагружения.

Дифференциальные кривые распределения, представленные на рис. 3., более

четко отражают зависимость гранулометрического состава капель от числа оборотов ротора диспергатора и времени выдержки полученной эмульсии. Видно, что все распределения двугорбые.

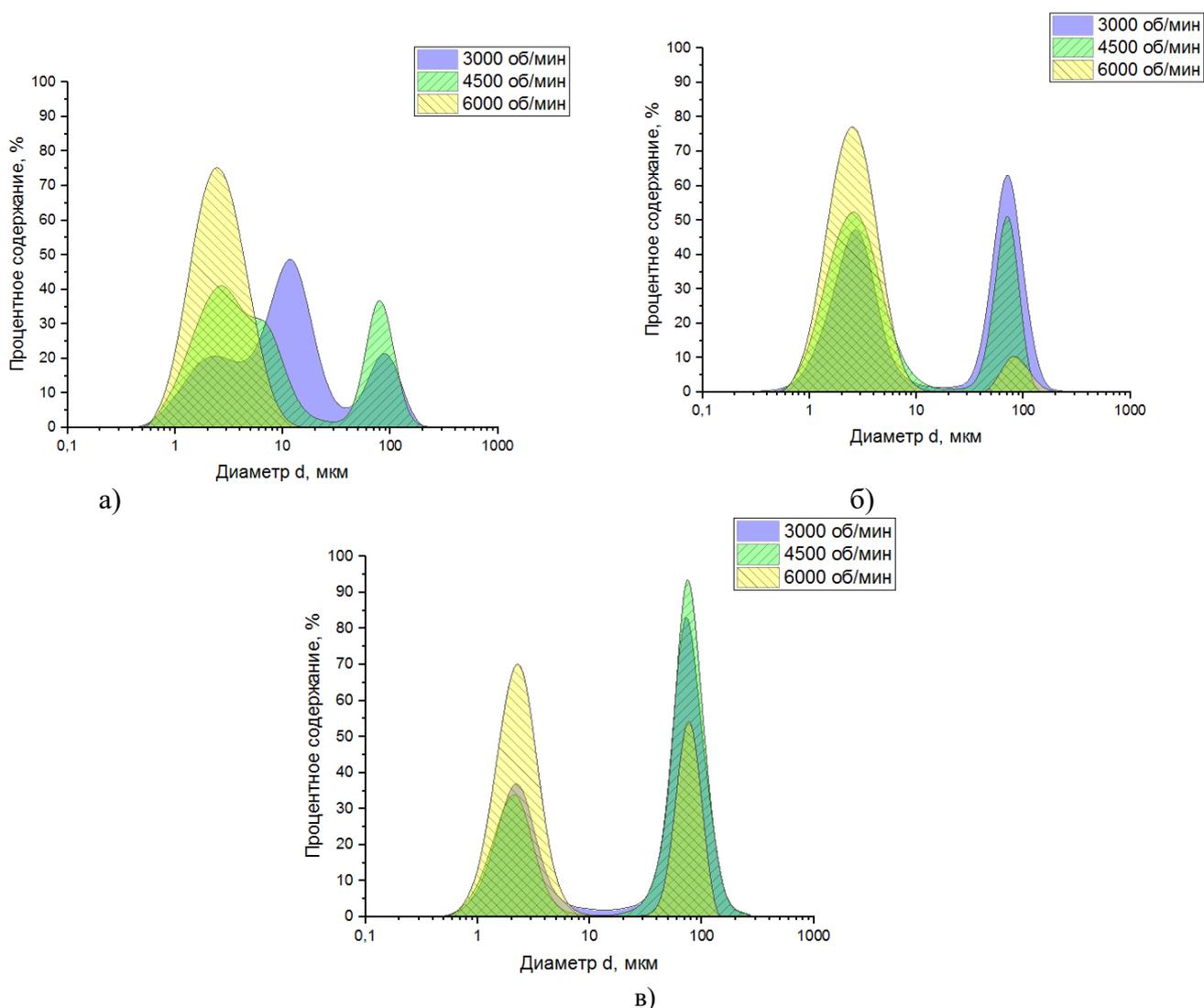


Рис. 3. Дифференциальные кривые распределения частиц капель масла эмульсии после 10-го цикла нагружения при 3000, 4500 и 6000 об/мин ротора диспергатора: а) спустя 1 час, б) спустя 24 часа, в) спустя 48 часов

Fig. 3. Differential curves of the distribution of particles of emulsion oil droplets after the 10th loading cycle at 3000, 4500 and 6000 rpm of the disperser rotor: a) after 1 hour, b) after 24 hours, c) after 48 hours

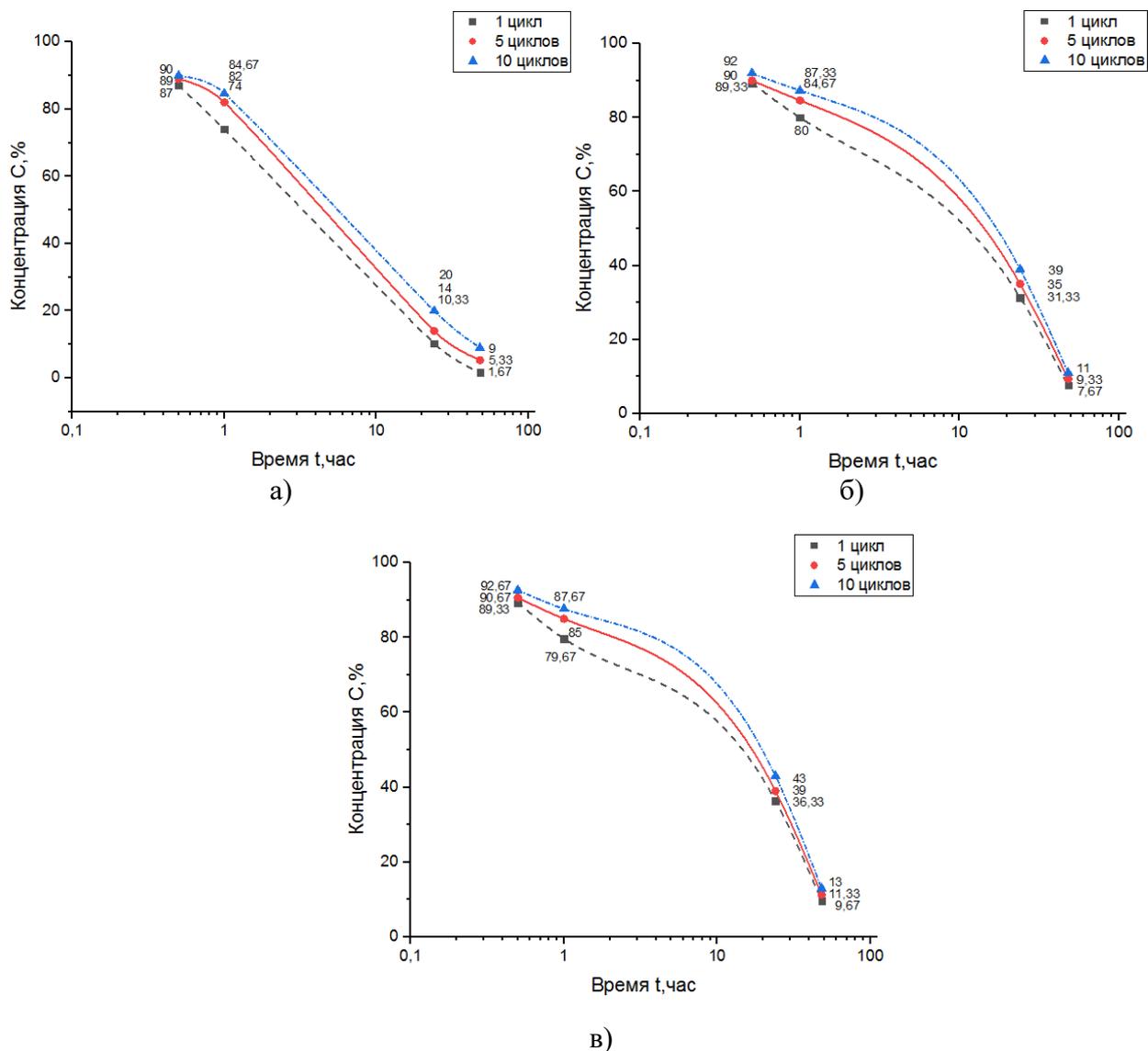
При 3000 об/мин наибольшее процентное содержание капель эмульсии располагается в интервале от 2 до 25 мкм, при 4500 об/мин – от 1 до 20 мкм, при 6000 об/мин – от 1 до 10 мкм; процентное содержание частиц составляет 99%.

Через 24 часа (рис. 3б.) практически полностью исчезли частицы размером от 10 до 40 мкм и образовались 2 пика распределения частиц. При этом остались капли размером от 0,4 до 10 мкм при 6000 об/мин (93% от общего объема), при 4500 об/мин (68%) и при 3000 об/мин (52%), а также частицы с размером от 40 до 200 мкм. Спустя 48 часов (рис. 3в.) по-

низилось процентное содержание мелких частиц (от 0,4 до 10 мкм) при 6000 об/мин с 93% до 68% и значительно повысилось содержание крупных капель при 4500 об/мин (от 40 до 200 мкм) и достигло практически 65%.

Представлены графики изменения концентрации подсолнечного масла в эмульсии при 3-х режимных оборотах ротора диспергатора (рис. 4).

Можно увидеть, что в первые минуты изменение концентрации масла имеет практически одинаковые показатели на всех циклах при 3000, 4500 и 6000 об/мин.



Через сутки заметно, что на 1-ом и 5-ом цикле нагружения концентрация масла на всех оборотах начинает резко падать.

При 10-кратном прохождении эмульсии через роторно-кавитационную установку, концентрация масла в эмульсии остается больше, чем на 1 и 5 цикле нагружения.

Можно сделать вывод, что наиболее стабильной эмульсией оказалась та, что проводилась, с использованием 5-10 циклов нагружения и при 4500 и 6000 об/мин роторно-кавитационного диспергатора.

Обработка экспериментальных данных позволила получить эмпирическое уравнение, описывающее изменение концентрации масла в эмульсии в зависимости от времени её выдержки.

$$C_m = 0,02\tau^2 - 2,6\tau + 90 \quad (1)$$

где C_m - концентрация масла в эмульсии, %;
 τ - время выдержки эмульсии, час.

Найденные значения коэффициента в уравнении (1) очень мало меняются при изменении числа оборотов ротора и числа нагружений эмульсий (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение расчетных и экспериментальных концентраций масла в эмульсии во времени при 6000 об/мин ротора диспергатора по уравнению (1)

Table 1. Comparison of calculated and experimental concentrations of oil in emulsion over time at 6000 rpm of the disperser rotor according to equation (1)

τ, час	$C_{M\text{расч.}}$	$C_{M\text{эсп.}}$	Δ, %
0,5	88,51	90,67	2,4
1	87,22	85	2,6
24	38,69	39	0,8
48	10,61	11,33	6,3

Выводы:

1) Повышение числа оборотов ротора диспергатора от 3000 до 6000 об/мин и числа циклов нагружения до 5-ти, позволило повысить дисперсность эмульсии и снизить средний размер её капель с 19 мкм до 3 мкм с получением наноразмеров капель (с размерами менее 1 мкм) до 15% от общего объема частиц.

2) Промежуточное охлаждение полученной эмульсии между циклами в кожухотрубном теплообменнике повысило её устойчивость.

3) Экспериментально получено, что нецелесообразно нагружать эмульсию более 5-ти раз.

4) Показано, что на устойчивость эмульсии незначительно влияют изменения числа оборотов ротора и числа циклов нагружения, что позволило получить эмпирическое уравнение для описания кинетики устойчивости эмульсии в системе масло в воде при использовании эмульгатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цымбалов А.С. Влияние поверхностно-активных веществ на диспергирование и стабильность водомасляных эмульсий. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2018. № 3 (55). С. 108-119.

2. Щукин Е.Д. Развитие учения П.А. Ребиндера о факторах сильной стабилизации дисперсных систем. *Коллоидный журнал*. 1997. № 2. С. 270-284.

REFERENCES

1. Tsymbalov A.S. Influence of surfactants on the dispersion and stability of water-in-oil emulsions. *Modern high technologies. Regional application*. 2018. N 3 (55). P. 108-119.

2. Shchukin E. D. Development of P.A. Rebinder on the factors of strong stabilization of dis-

3. Цымбалов А.С., Блиничев В.Н. Влияние конструктивно - режимных параметров на кавитационное воздействие. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2018. № 4 (56). С. 100-106.

4. Цымбалов А.С., Ларина А.И., Толстоухов С.А., Блиничев В.Н. Кинетическая устойчивость стабилизированной водомасляной эмульсии при цикловом нагружении. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2020. № 4 (64). С. 90 - 97.

5. Цымбалов А.С., Ларина А.И., Толстоухов С.А., Блиничев В.Н. Диспергирование состава масло – вода в роторно – кавитационной машине. *Российский химический журнал*. Том. LXIII, № 3-4, 2019. С. 91-96.

6. Цымбалов А.С., Ларина А.И., Толстоухов С.А., Блиничев В.Н. Исследование влияния типа ПАВ и числа оборотов роторного диспергатора на стабильность эмульсий в системе масло – вода. *Российский химический журнал*. Том. LXIII, № 3-4. 2019. С. 86-90.

7. Lagaly G., Schulz O., Zimehl R. Dispersionen und Emulsionen. Eine Einführung in die Kolloidik feinverteilter Stoffe einschließlich der Tonminerale. Mit einem historischen Beitrag über Kolloidwissenschaftler von Klaus Beneke. Steinkopff Verlag, Darmstadt, Germany. 1997. 560 p.

8. David E., Mukul M. The effect of colloidal particles on fluid-fliiid interfacial properties and emulsion stability. *Advances in Colloid and Interface Science*. 1994. P. 1-63.

9. Перегудова Л.И., Урьев Н.Б. Коллоидно-химические свойства смеси поверхностно-активных веществ. *Коллоидный журнал*. 1984. № 6. С. 1166-1171

persed systems. *Colloid Journal*. 1997. N 2. P. 270-284.

3. Tsymbalov A.S., Blinichev V.N. Influence of design and operating parameters on the cavitation effect. *Modern high technologies. Regional application*. 2018. N 4 (56). P. 100-106.

4. Tsymbalov A.S., Larina A.I., Tolstoukhov S.A., Blinichev V.N. Kinetic stability of a stabi-

lized oil-water emulsion under cyclic loading. *Modern high technologies. Regional application*. 2020. N 4 (64). P. 90 - 97.

5. **Tsymbalov A.S., Larina A.I., Tolstoukhov S.A., Blinichev V.N.** Dispersion of the oil - water composition in a rotary - cavitation machine. *Russian chemical journal*. Tom. LXIII, N 3-4, 2019. P. 91-96.

6. **Tsymbalov A.S., Larina A.I., Tolstoukhov S.A., Blinichev V.N.** Investigation of the influence of the surfactant type and the number of revolutions of the rotary disperser on the stability of emulsions in the oil-water system. *Russian chemical journal*. Tom. LXIII, N 3-4. 2019. P. 86-90.

7. **Lagaly G., Schulz O., Zimehl R.** Dispersionen und Emulsionen. Eine Einführung in die Kolloidik feinverteilter Stoffe einschließlich der Tonminerale. Mit einem historischen Beitrag über Kolloidwissenschaftler von Klaus Beneke. Steinkopff Verlag, Darmstadt, Germany. 1997. 560 p.

8. **David E., Mukul M.** The effect of colloidal particles on fluid-fluid interfacial properties and emulsion stability. *Advances in Colloid and Interface Science*. 1994. P. 1-63.

9. **Peregudova L.I., Uriev N.B.** Colloidal-chemical properties of a mixture of surfactants. *Colloid Journal*. 1984. N 6. P. 1166-1171.