

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАЗРУШЕНИЯ ПЕН

А. Н. Пахомов, Д. С. Пекшев, Н. Ц. Гагапова, Ю. В. Пахомова

*Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,  
rappost@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** дисперсность пены; интенсивность пенообразования; механические устройства; сепарация пены; синтез пигментов и красителей; устойчивость пены.

**Аннотация:** Представлены результаты систематизации данных, полученных в результате экспериментальных исследований основных механических способов разрушения пен, формирующихся в процессе синтеза пигментов и красителей. Цель систематизации – получение критерия, позволяющего численно оценить и выбрать способ пеноразрушения с максимальными показателями по интенсивности отбора газовой фазы без проскока жидкой фазы, обоснованно осуществить подбор аппаратурного оформления для процесса пеноразрушения.

---

### Введение

При синтезе большинства пигментов на отдельных стадиях в промышленных аппаратах наблюдается активное формирование пены. В зависимости от размера сепарационного пространства промышленных аппаратов объем выделяемой пены может достигать  $10 \text{ м}^3$  и более [1]. Такая пена возникает в результате выделения парогазовой фазы и наличия в компонентах реагирующей смеси поверхностно-активных веществ (ПАВ). Формирующаяся промышленная пена может иметь различные параметры – от мелко- до крупнодисперсной, с высокой и низкой устойчивостью, различной интенсивностью формирования пены над поверхностью жидкой фазы [2].

Активное формирование пены на отдельных стадиях синтеза пигментов приводит, как правило, к ухудшению качества целевого продукта, проскоку полупродуктов во вспененном состоянии в смежные по технологической схеме аппараты, быстрому загрязнению аппарата, повышенным энергозатратам, уменьшению производительности аппарата вплоть до его останова. Поэтому в производстве с активным пенообразованием применяют различные методы разрушения пен: механические, тепловые, физические и их комбинации [2]. При этом открытой остается проблема выбора эффективного метода пеноразрушения для конкретной пены, так как метод, хорошо себя зарекомендовавший на одной стадии, может оказаться неэффективным для другой.

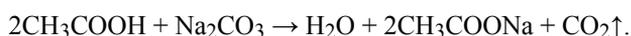
Экспериментальное исследование свойств промышленных пен и методов их разрушения часто сопряжено с рядом серьезных проблем, решение которых, в некоторых случаях, не представляется возможным [3, 4]. Это связано с тем, что, во-первых, зачастую на стадиях синтеза, сопровождающихся пенообразованием,

применяются редкие, дорогие компоненты, расход которых в лаборатории нецелесообразен, так как приведет к неприемлемой стоимости экспериментального исследования. Во-вторых, компоненты могут быть высокотоксичными и(или) сильно загрязняющими поверхности веществами. Соответственно работа с ними возможна только в определенных условиях на специализированном оборудовании, что также повысит стоимость исследования, либо не позволит исследовать некоторые перспективные методы воздействия на пену из-за ограничений применяемого в таких случаях специального оборудования.

*Цель статьи* – разработка методики формирования модельной пены с характеристиками (дисперсностью, интенсивностью выделения, устойчивостью), аналогичными исследуемым промышленным пенам. При этом необходимо, чтобы для формирования модельной пены применялись доступные, недорогие, неагрессивные компоненты, с которыми легко работать в условиях обычной химической лаборатории.

### Формирование модельной пены

Для получения модельной пены с различными параметрами использовали воду с заданным количеством ПАВ и диоксид углерода, выделяющийся в результате реакции взаимодействия этановой (уксусной) кислоты и карбоната натрия



В цилиндр загружали рассчитанное количество реагентов (воду, карбонат натрия и ПАВ) и тщательно перемешивали. В полученную смесь добавляли уксусную кислоту, в результате чего происходило вспенивание. При необходимости реакционную массу дополнительно перемешивали. В зависимости от соотношения реагентов получалась пена с разной стойкостью, дисперсностью и интенсивностью пеновыделения.

Дисперсность модельной пены определяли с помощью измерительного микроскопа подсчетом числа пузырьков определенного размера [5, 6]. Интенсивность пеновыделения оценивали по времени увеличения объема пены в цилиндре. Устойчивость и кратности модельной пены определялась по методике, представленной в [7].

Как следует из результатов экспериментов по определению дисперсности модельной пены, уменьшение расхода ПАВ приводит к увеличению размеров пузырьков, форма пузырька стремится к многоугольнику; увеличение расхода ПАВ – к уменьшению размеров пузырьков, форма пузырьков стремится к шарообразной. Варьируя расход уксусной кислоты и используя дополнительное перемешивание, можно изменять интенсивность пенообразования.

В результате экспериментов по формированию модельной пены с различными характеристиками получены пены с размерами пузырьков от 0,5 до 3 мм различной формы, кратностью от 10 до 50, устойчивостью от 18 до 110 с. Пены с указанными параметрами позволяют моделировать поведение промышленных пен, формирующихся в процессах синтеза большинства пигментов и красителей.

### Экспериментальная часть

Для анализа эффективности механических методов пеноразрушения предлагается ввести критерий эффективности пеноразрушения  $K$ , численные значения которого можно оценить по интенсивности пеноразрушения и объему разрушаемой пены (табл. 1).

**Значения критерия эффективности пеноразрушения  
по скорости и объему разрушаемой пены**

Эффективность пеноразрушения $K$	Поведение пены
0	Пена не разрушается
1	Пена разрушается незначительно (не более 10 % объема). Скорость разрушения пены мала (уменьшение объема происходит более чем за 15 с)
2	Пена значительно разрушается, но объем разрушаемой пены недостаточен (менее 50 %), возможно формирование вторичной мелкодисперсной пены
3	Пена значительно разрушается, но объем разрушаемой пены недостаточен (менее 80 %) и возможно формирование вторичной мелкодисперсной пены
4	Пена полностью разрушается, уменьшение объема происходит менее чем за 2...3 с, но возможно формирование вторичной мелкодисперсной пены
5	Пена быстро и полностью разрушается

Для оценки эффективности механических методов пеноразрушения использовалась установка, состоящая из мерного цилиндра диаметром  $d_{ц}$ , в котором происходит пенообразование, привода с механическим пеноразрушителем, видеокамеры. Кроме шкалы на цилиндре, устанавливалась дополнительная шкала для измерения высоты пены. Определение эффективности пеноразрушения проводилось на основе анализа видеозаписи взаимодействия формирующейся в цилиндре модельной пены и выбранного устройства пеноразрушения, при этом выделялись условно мелкодисперсная (размер пузырьков не более 1 мм) и крупнодисперсная (размер пузырьков более 1 мм) пены с низкой (увеличение объема на 100 % за 3...5 с) и высокой (увеличение объема 100 % за 0,5...2,0 с) интенсивностью. Устойчивость исследуемой пены составила 110 с. Для определения эффективности пеноразрушения выбраны двухлопастная (с плоскими лопастями) и пропеллерная мешалки, а также перфорированный вращающийся диск.

Исследуемая пена генерировалась в цилиндре диаметром 70 мм. Для определения эффективности пеноразрушения проведены исследования с мешалками диаметром  $0,5d_{ц}$ ,  $0,75d_{ц}$ ,  $0,9d_{ц}$ . Число оборотов варьировалось от 100 до 600 об/мин. Результаты анализа эффективности пеноразрушения мелко- и крупнодисперсной пен по предложенному критерию двухлопастной мешалкой с числом оборотов 400 (для малоинтенсивной пены) и 550 об/мин (для высокоинтенсивной) представлены в табл. 2.

В случае применения пропеллерной мешалки использовались мешалки с аналогичными диаметрами (число оборотов от 400 до 800 об/мин). Результаты (число оборотов 400 об/мин) показаны в табл. 2.

При использовании горизонтального вращающегося перфорированного диска (диаметры диска аналогичны диаметрам мешалки) число оборотов его варьировалось от 400 до 600 об/мин. Перфорация диска представляла собой два ряда концентрических отверстий по 8 и 4 отверстия диаметром 0,1 диаметра диска. Результаты анализа эффективности пеноразрушения перфорированным диском при 550 об/мин также представлены в табл. 2.

Как видно из данных табл. 2, крупнодисперсная пена разрушается легче, чем мелкодисперсная. Пена с высокой интенсивностью выделения разрушается

Таблица 2

## Оценка эффективности пеноразрушения двухлопастной мешалкой

Диаметр мешалки	Пена			
	мелкодисперсная		крупнодисперсная	
	Интенсивность			
	низкая	высокая	низкая	высокая
<i>Двухлопастная мешалка</i>				
0,5d <sub>ц</sub>	1	0	2	0
0,75d <sub>ц</sub>	2		3	1
0,9d <sub>ц</sub>	3	1	5	2
<i>Пропеллерная мешалка</i>				
0,5d <sub>ц</sub>	0	0	1	0
0,75d <sub>ц</sub>	1		3	1
0,9d <sub>ц</sub>	3	1	4	2
<i>Перфорированный диск</i>				
0,5d <sub>ц</sub>	0	0	0	0
0,75d <sub>ц</sub>	1		1	
0,9d <sub>ц</sub>	2		2	

медленнее, чем пена с низкой интенсивностью. Чем больше площадь контакта механического воздействия устройства пеноразрушения на пену, тем выше интенсивность пеноразрушения.

Визуальные наблюдения за процессом пеноразрушения выявили эффект формирования вторичной мелкодисперсной пены при взаимодействии механического пеноразрушителя с исходной пеной. При определенных условиях (форме и площади поверхности устройства, скорости движения устройства, интенсивности пенообразования) исходная пена разрушается при взаимодействии с элементами пеноразрушителя, но полной сепарации газовой и жидкой фаз не происходит, а возникает новая вторичная пена, размеры пузырьков которой меньше, чем размеры пузырьков исходной. При этом вторичная пена, как правило, более устойчива, чем исходная. Таким образом, при механическом пеноразрушении необходимо не допускать формирования вторичной пены.

## Определение критерия эффективности пеноразрушения

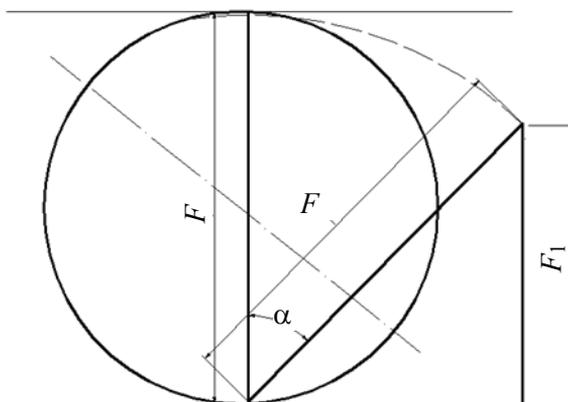
Безразмерный критерий оценки эффективности методов механического пеноразрушения должен учитывать свойства пены, степень механического воздействия на пену пеноразрушителем, а также оценить выявленный эффект формирования вторичной мелкодисперсной пены

$$K = S - (D + U + V + I), \quad (1)$$

где  $S$  – степень механического воздействия на пузырек пены;  $D$  – дисперсность пены (0 – крупнодисперсная, 1 – мелкодисперсная);  $U$  – коэффициент устойчивости пены;  $V$  – вероятность формирования вторичной пены;  $I$  – интенсивность формирования исходной пены (0 – низкая, 1 – высокая).

Оценим степень механического воздействия на пузырек пены  $S$  исходя из геометрической схемы воздействия лопасти на пузырек, представленной на рис. 1,

$$S_0 = (F \cdot l) \sin(90 - \alpha) / (F \cdot l) = \sin(90 - \alpha). \quad (2)$$



**Рис. 1. Схема расчета удельной площади воздействия на пузырек:**  
 $F$  – условный размер лопасти;  $F_1$  – эффективный условный размер лопасти;  
 $\alpha$  – угол наклона лопасти, град.

Исходя из выбранного диапазона значений критерия эффективности (см. табл. 1), запишем выражение для  $S$  в виде

$$S = 5OS_0 = 5O \sin(90 - \alpha), \quad (3)$$

где  $O$  – доля объема пены, на которую происходит воздействие пеноразрушителем.

Предлагается оценить величину  $O$  по доле объема аппарата, в котором происходит воздействие пеноразрушителем. Соответственно, для исследованных диаметров механических пеноразрушителей имеем следующие значения:  $0,5d_{ц}O = 0,5$ ;  $0,75d_{ц}O = 0,75$ ;  $0,9d_{ц}O = 1$ .

Величина параметра  $U$ , характеризующего устойчивость пены, полученная в результате анализа экспериментальных данных, представлена в табл. 3. Вероятность формирования вторичной пены  $V$  зависит от параметров  $S$ ,  $U$ ,  $D$  и скорости вращения устройства. Определение корректного вида зависимости для оценки вероятности формирования вторичной пены является специальной задачей, требующей отдельного исследования. Ориентировочно оценить зависимость  $V$  от скорости вращения механического устройства можно по результатам экспериментальных данных (табл. 4).

Таблица 3

Зависимость величины коэффициента  $U$  от устойчивости пены

Устойчивость, с	$U$
Не более 20	0
40	0,5
60	1,0
80	1,5
100 и более	2,0

Таблица 4

Зависимость величины параметра  $V$  от скорости вращения

Скорость, об/мин	$V$
100	0
200	
300	
400	0,2
500	0,4
600	0,6
700	0,8
800	1,0

Таблица 5

Сравнение расчетного и экспериментального значения критерия  $K$ 

Мелкодисперсная пена	Тип механического устройства	$d$	$U$	$S$	$D$	$U$	$V$	$I$	$K_{\text{эксп}}$	$K_{\text{расч}}$	$\Delta$	
Малоинтенсивная	Лопастная мешалка: 400 об/мин	$0,5d_{\text{ц}}$	0,5	2,5	1	0,5	0,2	0	1	0,8	0,2	
		$0,75d_{\text{ц}}$		4					2	2,3	0,3	
		$0,9d_{\text{ц}}$		5					3	3,3	0,3	
Высокоинтенсивная	550 об/мин	$0,5d_{\text{ц}}$	0,5	2,5	1	0,5	0,5	1	0	-0,2	-0,2	
		$0,75d_{\text{ц}}$		4					0	1	1	
		$0,9d_{\text{ц}}$		5					1	2	1	
Малоинтенсивная	Пропеллерная мешалка: 400 об/мин	$0,5d_{\text{ц}}$	0,5	2	1	0,5	0,2	0	0	0,3	0,3	
		$0,75d_{\text{ц}}$		3					1	1,3	0,3	
		$0,9d_{\text{ц}}$		4					3	2,3	0,7	
	Перфорированный диск: 550 об/мин	$0,5d_{\text{ц}}$		2					0,5	0	0	0
		$0,75d_{\text{ц}}$		2,5						1	0,5	0,5
		$0,9d_{\text{ц}}$		3						2	1	1

Результаты расчета критерия  $K$  и сравнения с экспериментально полученными значениями для механических пеноразрушителей при разных режимах представлены в табл. 5. Устойчивость исследованной пены составила 44 с. Средний размер пузырьков 0,5 мм.

## Заключение

Максимальное расхождение расчетного и экспериментального значений критерия  $K$  для механических пеноразрушителей при выбранных режимах не превышает 1 (см. табл. 5). Наиболее точно рассчитанный критерий  $K$  прогнозирует эффективность пеноразрушения для мало- и высокоинтенсивных пен при размерах пеноразрушителя, не перекрывающего полностью весь объем формирующейся пены. Оценки критерия  $K$ , полученные при разрушении пены устройствами с диаметром, близким к диаметру аппарата, для лопастной мешалки оказались завышенными, для пропеллерной мешалки и перфорированного диска – заниженными, что указывает на необходимость поиска дополнительных факторов, влияющих на степень механического воздействия на пузырек пены. Вероятнее всего, необходим учет влияния стенки аппарата на процесс разрушения пены. Отрицательные значения критерия  $K$  для режима пеноразрушения плоской мешалкой диаметром  $0,5d_{\text{ц}}$  для мелкодисперсной высокоинтенсивной пены при 550 об/мин хорошо коррелируют с наблюдаемым в этом случае активным формированием вторичной пены, замещающей исходную в аппарате.

Оценки параметров критерия эффективности пеноразрушения в исследованных диапазонах свойств пен и конструкций пеноразрушителей удовлетворительно прогнозирует эффективность пеноразрушения. Соответственно, предлагаемый критерий, можно использовать для выбора типа и основных размеров механического пеноразрушителя для пен с параметрами, удовлетворяющими исследованным.

### *Список литературы*

1. Клемпнер, Д. Полимерные пены и технологии вспенивания : пер. с англ. / Д. Клемпнер ; под ред. А. М. Чеботаря. – 2-е изд. – СПб. : Профессия, 2009. – 600 с.
2. Тихомиров, В. К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения / В. К. Тихомиров. – М. : Химия, 1983. – 264 с.
3. Канн, К. Б. Капиллярная гидродинамика пен / К. Б. Канн ; отв. ред. И. Р. Шрейбер ; АН СССР. СО. Ин-т пробл. освоения Севера. – Новосибирск : Наука, 1989. – 166 с.
4. Кругляков, П. М. Пена и пенные пленки / П. М. Кругляков, Д. Р. Ексерова. – М. : Химия, 1990. – 426 с.
5. Коузов, П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П. А. Коузов. – Л. : Химия, 1987. – 264 с.
6. Кларк, Э. Р. Микроскопические методы исследования материалов / Э. Р. Кларк, К. Н. Эберхардт. – М. : Техносфера, 2007. – 376 с.
7. ГОСТ Р 50588–2012 Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования и методы испытаний. – Введ. 2012-09-01. – М. : Стандартинформ, 2012. – 24 с.

---

## **Assessment of the Effectiveness of Mechanical Methods for Foam Destruction**

**A. N. Pakhomov, D. S. Pekshev, N. Ts. Gatapova, Yu. V. Pakhomova**

*Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety,  
panpost@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** foam dispersion; foaming intensity; mechanical devices; foam separation; synthesis of pigments and dyes; foam stability.

**Abstract:** The results of systematization of data obtained as a result of experimental studies of the main mechanical methods of destruction of foams formed during the synthesis of pigments and dyes are presented. The purpose of systematization is to obtain a criterion that allows one to numerically evaluate and select a method of foam destruction with maximum indicators for the intensity of gas phase selection without leakage of the liquid phase, and to reasonably select the equipment for the foam destruction process.

### *References*

1. Klempner D., Chebotar' A.M. (Ed.) *Polimernyye peny i tekhnologii vspenivaniya* [Polymer foams and foaming technologies], St. Petersburg: Professiya, 2009, 600 p. (In Russ.)
2. Tikhomirov V.K. *Peny. Teoriya i praktika ikh polucheniya i razrusheniya* [Foams. Theory and practice of their production and destruction], Moscow: Khimiya, 1983, 264 p. (In Russ.)
3. Kann K.B.; Shreyber I.R. (Ed.) *Kapillyarnaya gidrodinamika pen* [Capillary hydrodynamics of foams], Novosibirsk : Nauka, 1989, 166 p. (In Russ.)

4. Kruglyakov P.M., Yekserova D.R. *Pena i pennyye plenki* [Foam and foam films], Moscow: Khimiya, 1990, 426 p. (In Russ.)

5. Kouzov P.A. *Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pyley i izmel'chennykh materialov* [Fundamentals of analysis of the dispersed composition of industrial dusts and crushed materials], Leningrad: Khimiya, 1987, 264 p. (In Russ.)

6. Klark E.R., Eberkhardt K.N. *Mikroskopicheskiye metody issledovaniya materialov* [Microscopic methods for studying materials], Moscow: Tekhnosfera, 2007, 376 p. (In Russ.)

7. GOST R 50588-2012. *Penoobrazovateli dlya tusheniya pozharov. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya i metody ispytaniy* [Foaming agents for extinguishing fires. General technical requirements and test methods], Moscow: Standartinform, 2012, 24 p. (In Russ.)

---

### **Bewertung der Wirksamkeit mechanischer Methoden der Schaumzerstörung**

**Zusammenfassung:** Es sind die Ergebnisse der Systematisierung von Daten vorgestellt, die als Ergebnis experimenteller Studien zu den wichtigsten mechanischen Methoden zur Zerstörung von Schäumen gewonnen worden sind, die bei der Synthese von Pigmenten und Farbstoffen entstehen. Der Zweck der Systematisierung besteht darin, ein Kriterium zu erhalten, das es ermöglicht, eine Methode zur Schaumzerstörung mit maximalen Indikatoren für die Intensität der Gasphasenauswahl ohne Leckage der flüssigen Phase numerisch zu bewerten und die Ausrüstung für den Schaumzerstörungsprozess sinnvoll auszuwählen.

---

### **Évaluation de l'efficacité des méthodes mécaniques de destruction des mousses**

**Résumé:** Sont présentés les résultats de la systématisation des données obtenues à la suite des études expérimentales sur les principales méthodes mécaniques de la destruction des mousses formées lors de la synthèse des pigments et des colorants. Le but de la systématisation est d'obtenir un critère permettant d'évaluer et de sélectionner une méthode de destruction des mousses avec des valeurs maximales pour l'intensité de sélection de la phase gazeuse sans passer par la phase liquide, ce qui nécessite de sélectionner la conception matérielle pour le processus de destruction de mousse.

---

**Авторы:** *Пахомов Андрей Николаевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Пекшеев Дмитрий Сергеевич* – аспирант кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Пахомова Юлия Владимировна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.