

*В.И. Мелик-Гайказян, Н.П. Емельянова,
П.С. Козлов, М.И. Труфанов, Н.С. Фролов,
Т.И. Юшина, Е.Н. Липная*

**К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ
И РАЗРУШЕНИЯ ПЕНЫ НА ОСНОВЕ СНЯТИЯ
РЕЛАКСАЦИОННЫХ КРИВЫХ $\sigma(t)$ НА ПОВЕРХНОСТИ
ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПУЗЫРЬКОВ**

Семинар № 25

1. Существующие представления о процессах образования и разрушения пены и влиянии на эти процессы соответствующих реагентов основаны на наблюдениях, проводимых в **статических** условиях за изменениями макроскопических параметров созданного пенного слоя, например, за уменьшением его высоты H во времени t , то есть, на снятии зависимости $H(t)$, а также на наблюдениях за изменениями в пенных пленках [1, 2].

2. К этим способам исследования предполагается добавить еще элемент **динамической** характеристики поверхности пузырьков, составляющих пену, в виде снятия на них релаксационных кривых $\sigma(t)$, отражающих изменение во времени разности $\Delta\sigma$ между динамическим поверхностным натяжением σ_d и равновесным его значением σ_p . Значения $\Delta\sigma = \sigma_d - \sigma_p$ характеризуют величину возникшей на поверхности пузырька неравновесности, которая, по-видимому, не может не влиять на зависимость $H(t)$. Опыт показывает, что в чистой жидкости, для которой $\Delta\sigma = 0$, устойчивой пены не образуется, кроме очень вязких жидкостей. Необходимо заметить, что именно разность $\Delta\sigma$, а не абсолютная

величина σ важна для пенообразования. Физический смысл величины $\Delta\sigma$, как меры неравновесности, был показан ранее [3, с.24] и пояснен в виде простой схемы несколько позже [4, с.11].

3. Для того чтобы выяснить, имеется ли корреляция между зависимостями $H(t)$ и $\sigma(t)$, были проведены измерения с одними и теми же растворами реагентов по двум методикам (см. п. 8).

4. Поскольку для получения зависимости $H(t)$ в литературе указывается несколько различных методик (более 5-ти), то для надежности были выбраны две наиболее цитируемые и исследована возможность получения посредством них одинаковых зависимостей для одних и тех же растворов. Рассмотрим эти методики, так как они несколько отличаются от известных под теми же названиями.

5. Метод встряхивания раствора **механизирован**. Встряхивание исследуемого раствора в цилиндре с целью создания пены широко распространено, однако, обычно оно производится вручную, что трудоемко и, по общему мнению, может вносить некоторую невоспроизводимость получаемых результатов.

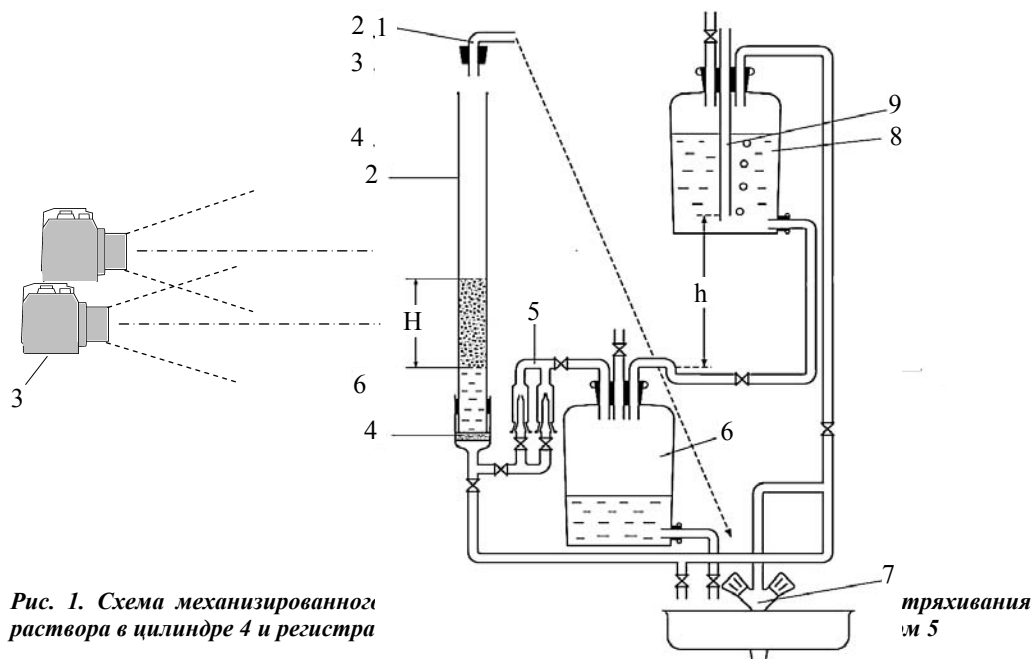


Рис. 1. Схема механизированного раствора в цилиндре 4 и регистра

Рис. 2. Схема аэрирующего устройства для генерации пены методом барботаж раствора в цилиндре 2 и регистрации высоты H столба пены цифровым аппаратом 3

На рис. 1 приведена использованная нами простая конструкция, позволявшая проводить встряхивание как литрового цилиндра, так и трубки меньшего диаметра, помещенной в захватывающее устройство 1. Следует только в каждом случае предварительно уравнивать их массу грузами 10. Меня возбуждение на якоре двигателя 8 постоянного тока мощностью 250 Ватт (сравнительно мощного для данного случая), можно легко регулировать число оборотов якоря и задавать желаемую частоту встряхиваний. Для плавности работы установлен уравновешенный маховик 7. Вся движущаяся часть конструкции для легкости изготовлена из дерева, а несущая для жесткости свинчена из стального квадрата 20x20 мм.

Операция пенообразования производится следующим образом. В стеклянный цилиндр 4 с внутренним диаметром 24 мм и длиной 600 мм зали-

вается 50 мл исследуемого раствора. Цилиндр помещается в захватывающее устройство 1 и встряхивается с амплитудой 100 мм и частотой 225 колебаний в минуту в течение 30 секунд. После этого замеряется высота H образующейся слоя пены и определяется время t ее разрушения. Результаты фиксируются путем непрерывного фотографирования цифровым аппаратом 5. Каждая кривая $H(t)$ строится компьютером как минимум по 10-15-ти точкам. Опыт длится несколько минут и может быть повторен многократно с высокой воспроизводимостью результата. Рядом с цилиндром 4 помещается цветная полоска высотой 100 мм. Они фотографируются вместе, и длина полоски служит масштабом для оценки высоты H слоя пены.

После этого в цилиндр 4 заливается раствор в два раза большей концентрации реагента, и опыт повторяется для оценки влияния концентрации

пенообразователя и различных добавок к нему на измеряемые значения H и t . Таким образом охватывается широкий диапазон концентраций.

Остальными составляющими рассматриваемого устройства являются пульт управления 8 и торцовые осветители пены для получения четких границ ее слоя: сверху - это светодиоды 2 в отполированной прозрачной плексигласовой пробке 3, а снизу - обычный осветитель 6 с электролампой и линзой. Торцовое освещение пены исключает блики на стенках цилиндра, которые затрудняют обработку фотографий на компьютере.

6. Получение пены методом аэрации раствора реагента производилось на установке рис. 2.

В стеклянную трубку 2, вставленную с уплотнением в воронку фильтра Шот-

та 4, заливается 50 мл исследуемого раствора, который аэрируется воздухом из баллона 6 в течение 30 сек. Расход воздуха дозируется диаметром отверстия одного из капилляров 5 (их несколько). Острие капилляра должно быть направлено навстречу потоку воздуха. Капилляр на шлифе вставлен в стеклянную трубку, которая предохраняет его от поломки и загрязнений.

Благодаря трубке Мариотта 8, напор воды, поступающей в баллон 6 из баллона 9, постоянен и не зависит от его заполнения водой. Величина этого напора равна $h \cdot \delta \cdot g$, где h – высота столба воды; δ – плотность воды и g – ускорение свободного падения. Высота h должна обеспечивать аэрацию исследуемой жидкости в трубке 2, но быть возможно меньшей. Это обеспечивает стабильность в работе устройства.

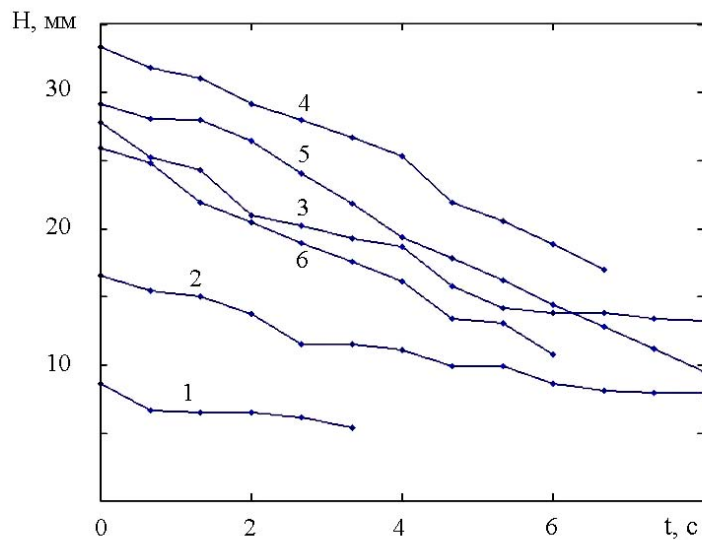


Рис. 3. Кривые $H(t)$ саморазрушения пены, полученные на механическом встряхивателе на поверхности водных растворов Т-66 следующих концентраций: 1 - 0.02 г/л; 3 - 0.1 г/л; 5 - 2.0 г/л; 2 - 0.05 г/л; 4 - 0.5 г/л; 6 - 4.0 г/л
Опыт 20.05.2007(ПВ)(1) при 25 °С

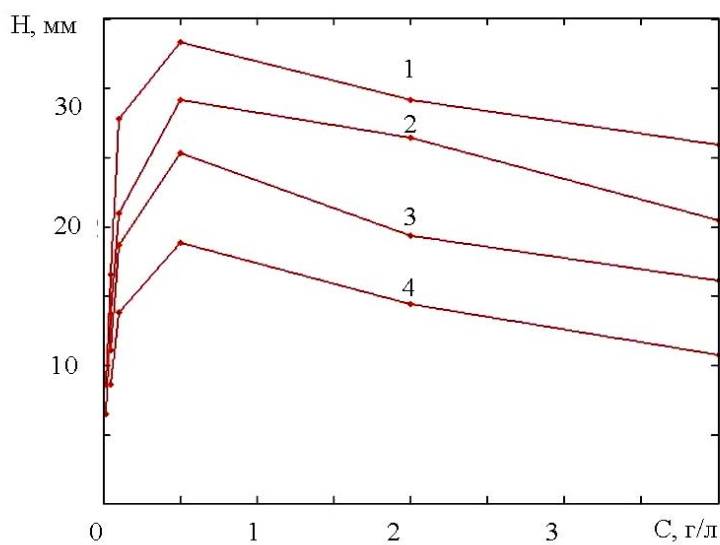


Рис. 4. Кривые $H(C)$ иллюстрируют максимум толщины слоя пены и максимум ее устойчивости на поверхности раствора Т-66 при концентрации 0.5 г/л.
Кривые построены по данным рис. 3 через 0; 2; 4; 6; с после начала разрушения пены: 1 – 0 с; 2 – 2 с; 3 – 4 с; 4 – 6 с
К опыту 20.05.2007(ПВ)(1) при 25 °С

Методика проведения опытов тождественна рассмотренной в п.5. Для промывки трубки 2 и пластины 4 используется теплая водопроводная вода из системы 7 и соединительная трубка 1 с пробкой, вставляемой в трубку 2 сверху для слива промывной воды в раковину. Операции с кранами просты и, по-видимому, не требуют пояснений.

Чистота отмывания фильтра Шотта и трубки 2 перед опытом проверяется контрольным продуванием воздуха через залитую в трубку 2 чистую воду.

Результаты фиксируются цифровым аппаратом и показывают высокую воспроизводимость. Вместе с тем следует отметить, что значения высоты H и времени t разрушения пены в сильной мере зависят от расхода воздуха на аэрацию, дозируемого одним из капилляров 5. Так, при расходах воздуха 0,14; 0,22 и 0,30 литра в минуту высоты H столба пены разительно отличаются (они в отдельных случаях составляют соответственно 3÷4, 70 и 400 мм). С помощью капилляров можно подобрать и такие расходы воздуха, чтобы фиксируемые значения H , совпадали с полученными по п.5. Тем не менее, во всех случаях получаются в принципе похожие результаты с максимумом высоты H при средней концентрации реагента.

Практический опыт показал, что работа по первой методике (п.5) предпочтительнее, поскольку в ней исключено выдувание реагента из раствора аэрирующим воздухом и отсутствует необходимость в промывании пористой пластины от остатков ранее испытываемых реагентов. Необходимо отметить, что применение цифровой технологии крайне полезно, поскольку резко повышается объективность получаемых результатов.

7. На рис. 3 приведены зависимости $H(t)$, полученные на механическом встряхивателе, изображенном на рис. 1, с растворами Т-66 различных концентраций C от 0,02 до 4,0 г/л. Из кривых следует, что наибольший столб пены наблюдается при концентрации 0,5 г/л. Более наглядно это изображено на графике рис.4, построенном в координатах $H(C)$ для различных моментов времени t , равных 0; 2; 5; 8 секунд после начала разрушения пены. Кривые имеют максимум при концентрации 0,5 г/л.

Аналогичные кривые приведены на рис. 5 и рис. 6 для пены, полученной на установке с аэрирующим устройством, изображенной на рис. 2. На кривых также наблюдается максимум пенообразования при концентрации Т-66 0,5 г/л.

Из полученных результатов можно заключить, что в случае флотационных вспенивателей обе методики приводят к практически одинаковым результатам, однако, по причинам, указанным в п.6, дальнейшие исследования предполагается проводить по методу механического встряхивания исследуемого раствора.

Впервые для пенообразователей, используемых при флотации, на подобный характер зависимости $H(C)$ указал О. Барч в 1925 г. Ее подтвердил Н.А. Алейников, проводивший в 1930-1931 гг. обширные исследования [6]. Оба автора указывали на необходимость измерения σ для объяснения процесса пенообразования. То же наблюдается и в классических монографиях [1, 2]. В 1927 г. А.Ф. Таггарт в своем справочнике [7] (русский перевод 1933 г.) указывал на корреляцию между высотой столба пены H и величиной $\Delta\sigma$, а не просто σ . Одной из целей настоящей работы была проверка этого утверждения Таггарта.

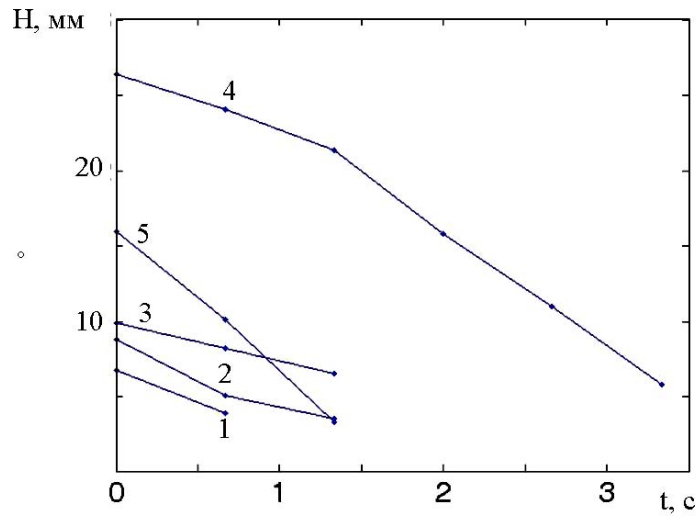


Рис. 5. Кривые $H(t)$ саморазрушения пены, полученной на установке рис. 2 путем барботирования растворов Т-66 следующих концентраций: 1 – 0,02 г/л; 3 – 0,1 г/л; 5 – 2,0 г/л; 2 – 0,05 г/л; 4 – 0,5 г/л
Опыт 20.05.2007 (ПА)(3) при 25 °С

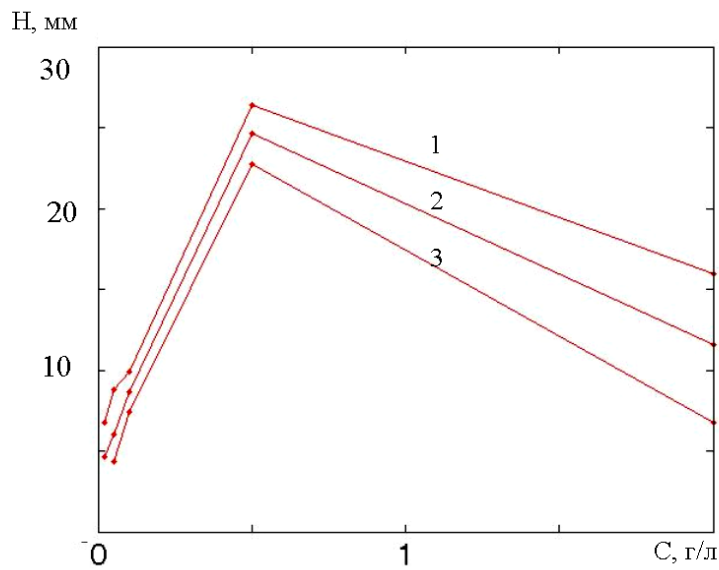


Рис. 6. Кривые $H(C)$ иллюстрируют максимум толщины слоя пены и максимум ее устойчивости на поверхности раствора Т-66 при концентрации 0,5 г/л. Кривые построены по данным рис.3 через 0; 1; 2 с после начала разрушения пены: 1 - 0 с; 2 - 1с; 3 - 2 с.
К опыту 20.05.2007(ПА)(3) при 25 °С

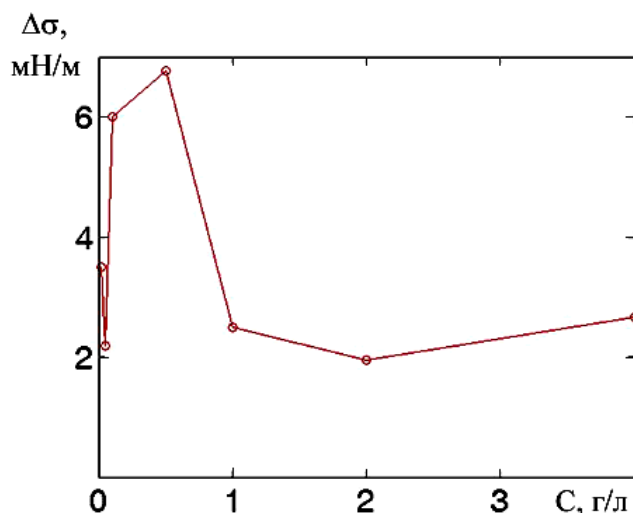


Рис. 7. Значения $\Delta\sigma$, вычисленные по данным, полученным в растворах Т-66 для различных концентраций: 0.02; 0.05; 0.1; 0.5; 2.0; 4.0 г/л.

8. Снятие кривых $\sigma(t)$ также связано с применением цифровой технологии. В таблице приведены значения σ на различных этапах снятия релаксационной кривой

Существо методики состоит в том, что на кончике стеклянной трубочки в растворе Т-66 выдувается пузырек и по форме его меридионального контура определяется величина σ на его поверхности. Когда σ принимает равновесное значение σ_p (через 10÷20 минут), пузырек раздувают на определенную постоянную величину и фотографируют через заданные промежутки времени. По контурам этих пузырьков, переданных фотоаппаратом в компьютер, определяют динамические значения поверхностного натяжения σ_d . Они непрерывно понижаются от максимального значения, полученного в первый момент после растяжения, до значения, близкого к σ_p , поскольку нарушенные при раздувании пузырька адсорбционные слои возвращаются в состояние равновесия. Время, при котором

$\Delta\sigma \approx 0$, принимается за время релаксации t_p .

В таблице приведены начальные значения σ_n до раздувания (время t отрицательное), затем первое значение σ_d в момент раздувания ($t = 0$) и далее перечисляются времена фотографирования и соответствующие им значения σ_d и σ_p . В нижней строке таблицы приведены величины $\Delta\sigma$, рассчитанные с использованием максимальных значений σ_d :

$$\Delta\sigma' = \sigma_d - \sigma_n$$

$$\Delta\sigma = \sigma_d - \sigma_p.$$

По данным таблицы построен график зависимости $\Delta\sigma$ от концентрации C раствора, приведенный на рис. 7.

Из сопоставления результатов, приведенных на рис.4, рис.6 и рис.7, нетрудно заметить совпадение максимумов на кривых $H(C)$ и $\Delta\sigma(C)$. Это совпадение подтверждает точку зрения А.Ф. Таггарта о том, что величина $\Delta\sigma$ является важным фактором, оказывающим влияние, как на процесс пенообразования, так и на

эффективность пенной флотации. Необходимо заметить, что величина $\Delta\sigma$ явля-

ется и фактором, определяющим прочность закрепления частиц на пузырьках, а также тормозящим истечение жидкости из каналов Плато и повышающим продолжительность "жизни" пены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тихомиров В.К.* Пены. Теория и практика их получения и разрушения. 2-е изд. перераб. – М.: Химия, 1983. – 264 с., ил.
2. *Кругляков П.М., Ексерова Д.Р.* Пены и пенные пленки. – М.: Химия, 1990. – 432 с.
3. *Физико-химические основы теории флотации* /О.С. Богданов, А.М. Гольман, И.А. Каковский и др. – М.: Наука, 1983. – 264 с.
4. *Мелик-Гайказян В.И., Драганов А.В., Емельянова Н.П., Ермаков К.Г.* Оценка релаксационных характеристик аполярных флотореагентов //Известия вузов. Цветная металлургия. 2004. № 5, с.10-13.
5. *Bartsch O.* Über Schaumssysteme. Kolloidchemische Beihefte. 1925, Bd.20, s.50
6. *Алейников Н.А.* Диспергирование воздуха в водных растворах. Цветные металлы, 1931, № 12, с.1546.
7. *Таггарт А.Ф.* Справочник по обогащению полезных ископаемых. М6 ГНТИ, 1933, т.2. – 535 с. **ГИАЭ**

Коротко об авторах

Мелик-Гайказян В.И. – доктор химических наук, профессор, руководитель лаборатории поверхностных явлений и флотации,
Емельянова Н.П. – кандидат химических наук, доцент,
Козлов П.С. – аспирант,
Труфанов М.И. – кандидат технических наук, доцент,
Фролов Н.С. – кандидат технических наук, доцент,
Курский государственный технический университет,
Юшина Т.И. – кандидат технических наук, доцент,
Липная Е.Н. – аспирант,
Московский государственный горный университет.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 25 симпозиума «Неделя горняка-2007».
Рецензент д-р техн. наук, проф. *В.М. Авдохин.*

