

ТЕХНІЧНІ НАУКИ**Атапін В.Г.***аспірант;***Нефедов В.Г.***доктор технічних наук, професор,**Український державний хіміко-технологічний університет***ГИДРОДИНАМИКА ВСПЛЫТИЯ ПУЗЫРЕЙ
В КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ РАСТВОРАХ**

Образование газовых пузырей на электродах – процесс, очень широко распространенный в электрохимических технологиях синтеза неорганических и органических веществ, получении металлов, осаждении гальванических покрытий. Всплывающие между электродами газовые пузыри увеличивают сопротивление электролита и энергоемкость процесса в целом. При этом, величина газонаполнения связана с скоростью движения пузырей относительно жидкости формулой Маруччи [1]. Поэтому оценка факторов, влияющих на скорость всплытия как единичных пузырей, так и их шлейфа представляет важную теоретическую и практическую задачу. Целью данной работы было оценить влияния вязкости электролитов, размеров пузырей и режима их движения на скорость всплытия.

В общем виде, скорость движения пузырьков зависят от соотношения выталкивающей силы и сил вязкого торможения.

Выталкивающая сила, действующая на газовый пузырек в жидкости, определяется, как

$$F_A = \frac{\pi d^3}{6} \rho g \quad (1)$$

Где d – диаметр пузыря; g – ускорение силы тяжести; ρ – плотность жидкости

Сила гидродинамического сопротивления движению пузыря зависит гидродинамического режима его движения, который определяется величиной критерия Рейнольдса.

$$Re = \frac{U d \rho}{\mu} \quad (2)$$

Где μ – динамическая вязкость воды; U – скорость движения.

При $Re < 1$ в чистых растворах скорость движения пузыря описывается формулой Рыбчинского-Адамара

$$U = \frac{1}{3} \frac{g r^2}{\nu} = \frac{1}{12} \frac{\rho g d^2}{\mu} \quad (3)$$

В области чисел Рейнольдса $1 < Re < 1000$ движение пузырей соответствует переходному режиму. В этом случае за пузырем появляется узкий турбулентный след, а скорость подъема пузыря в этом случае равна

$$U = \frac{1}{36} \frac{g \rho d^2}{\mu} \quad (4)$$

Для режимов движения, отличных от ламинарного, скорость всплытия пузырьков предлагается определять по формуле (6), учитывающей величину коэффициента сопротивления движению C_d .

$$U = \sqrt{\frac{4gd\Delta\rho}{3C_d\rho}} \quad (5)$$

где: C_d – коэффициент сопротивления среды, зависящий от числа Рейнольдса.

Коэффициент C_d в широком диапазоне чисел Рейнольдса рассчитывается по зависимости (6) с эмпирическими коэффициентами А и В

$$C_d = \frac{A}{Re} + \frac{B}{Re^{0,5}} \quad (6)$$

При этом: для $2 \leq Re \leq 15$ $A = 5,21$, $B = 13,1$,

$15 \leq Re \leq 200$ $A = 41,9$, $B = 1,82$ [2]

Экспериментальные измерения показали, что размер пузырей, выделяющихся через капилляр диаметром 0,25мм, составляют около 2мм, что соответствует условиям их отрыва от твердой поверхности при барботаже [2].

Зависимость скорости движения пузырей от вязкости раствора измеренных экспериментально показана на рис.1, кривая 1.

По полученным величинам скорости и по формуле (2) для пузырей диаметром 2мм, всплывающих в растворе NaOH концентрацией от 8 до 16 М были рассчитаны величины критериев Рейнольдса, рис. 3. Величина $Re > 2$ и пузыри движутся в переходном режиме.

По формуле (4) были рассчитаны величины скорости всплытия пузырей для переходного режима, кривая 2. Сравнивая экспериментально измеренные и рассчитанные по (4) величины можно отметить удовлетворительное совпадение результатов. Для постоянных размеров пузырей скорость всплытия увеличивается пропорционально плотности раствора и уменьшается пропорционально вязкости. Поскольку вязкость меняется больше плотности, скорость движения должна уменьшаться.

Расчет по скорости движения по (5) и коэффициентов торможения по (6) для соответствующих величин критерия Рейнольдса также показан на рисунке 1, кривая 3. Рассчитанные по этим формулам скорости движения пузыря значительно больше, и имеют тенденцию к увеличению с ростом вязкости раствора. Это указывает на ограниченную применимость данной формулы для расчета скорости движения пузырей.

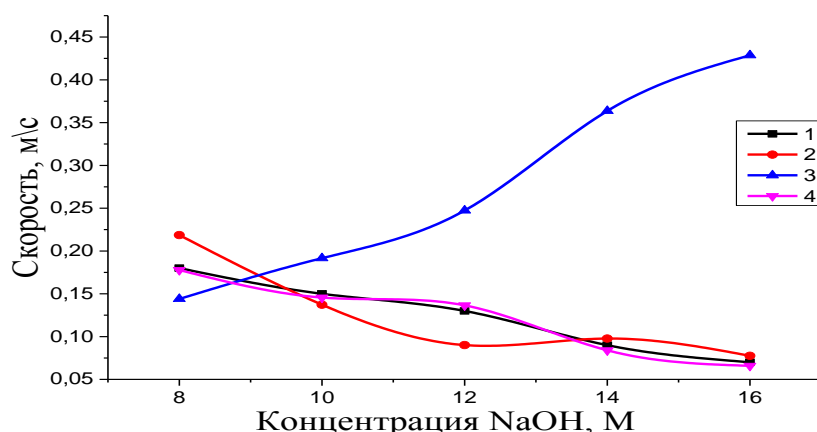


Рис. 2. Зависимости скорости движения единичного пузыря от вязкости электролита

1-экспериментальные данные, 2- по формуле (4), 3- по формулам (5) и (6), 4-по формулам (5) и (7).

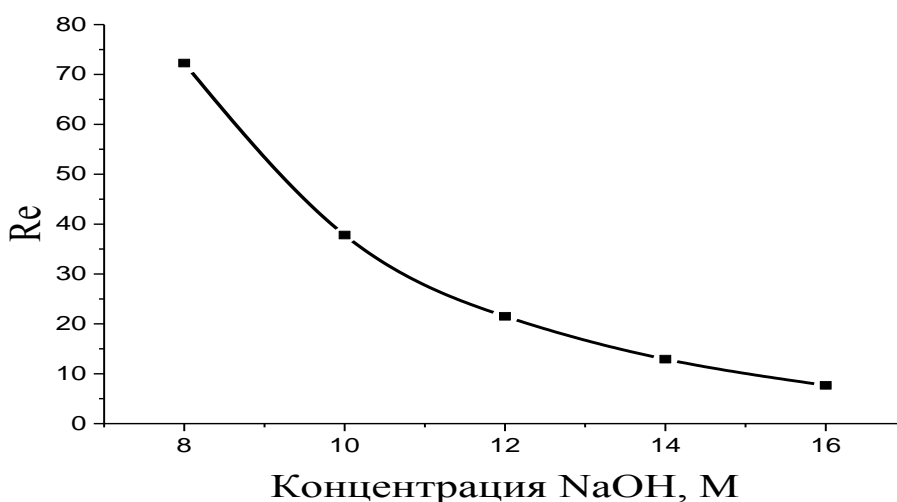


Рис.3. Зависимость величины критериев Рейнольдса от вязкости раствора NaOH

Источник: разработка автора (-ами)

Было предположено, что причиной может быть действие фактора, не учитываемого в этих формулах. В литературе отмечается [4], что всплывающие пузырьки диаметром 0,2 – 1,5 см начинают деформироваться, приобретая форму эллипсоида. Для расчета коэффициента C_d с учетом фактора формы Φ , показывающего отклонение геометрии пузыря от сферичности, предложена формула (7) [5].

$$C_d = 0,42 \cdot 10^{1,8148(-\log\Phi)^{0,5743}} \quad (7)$$

Расчеты показали, что в растворах гидроксида натрия концентрацией от 8 до 16М для получения близких к экспериментальным скоростям движения пузырей величина фактора формы должна меняться от 0,99 до 0,9999. То есть, наиболее близкая к сфере форма пузырей в самых концентрированных

растворах с максимальной величиной поверхностного натяжения. Зависимость величины фактора формы от поверхностного натяжения приведена на рис. 4.

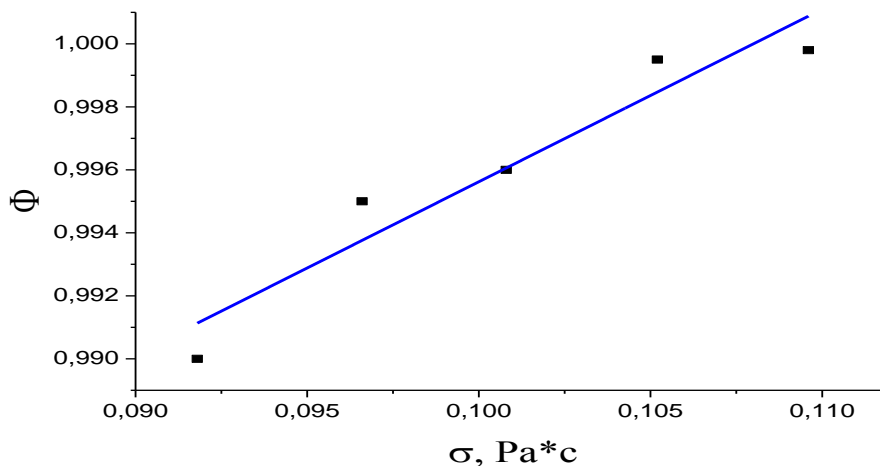


Рис.4. Зависимость величины фактора формы Φ от поверхностного натяжения σ

Источник: разработка автора (-ами)

Скорость всплытия пузырька рассчитанной по (5) с использованием C_d рассчитанного по (7) показана рисунке 1, кривая 4. Можно отметить полное совпадение величины скорости всплытия рассчитанной и измеренной экспериментально.

Адекватная измеренным величинам рассчитанная скорость всплытия пузырей размеров около 2мм при переходном режиме движения может быть получена только при учете фактора формы, который зависит как от плотности раствора, так и от размера пузыря и величины поверхностного натяжения. Можно отметить практически пропорциональное увеличение фактора Φ от поверхностного натяжения.

Список использованных источников:

1. Дж. Астарита, Дою. Марручи. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей. – М.: Мир, 1978, 309 с.
2. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – Рипол Классик, 2005.
3. Процессы и аппараты природоохранных технологий. Теоретические основы. – Сумы: Университетская книга, 2011, 284 с.
4. Donnellan P., Byrne E., Cronin K. Analysis of the velocity and displacement of a condensing bubble in a liquid solution //Chemical Engineering Science. – 2015. – Т. 130. – С. 56-67.
5. Hölzer A., Sommerfeld M. New simple correlation formula for the drag coefficient of non-spherical particles //Powder Technology. – 2008. – Т. 184. – №. 3. – С. 361-365.