

ДВИЖЕНИЕ ПУЗЫРЬКОВ ГАЗА В ЗАТОПЛЕННОЙ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СТРУЕ, УДАРЯЮЩЕЙ В ПЛОСКИЙ ЭКРАН

Дмухайло Е. И., Хайко А. С.

УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест

Для распределения газожидкостной смеси в аэрационных и флотационных камерах с успехом могут применяться вертикальные затопленные газожидкостные струи, ударяющие в плоский экран. Такая струя была использована для распределения газожидкостной смеси (рабочей жидкости) в устройстве, состоящем из сопла и отбойно-распределительного щита. Основная задача такого устройства – создать факел всплывающих газовых пузырьков, равномерно распределенных по сечению флотационной камеры. Поэтому важно определить, от каких факторов зависит радиус упомянутого факела и выявить характер данной зависимости.

Движение газожидкостной смеси в узле распределения рабочей жидкости представляет собой затопленную турбулентную осесимметричную струю воды, содержащую пузырьки газа (воздуха), ударяющую под углом 90° в плоский экран. Данная задача рассматривалась в [1,2] применительно к турбулентной осесимметричной струе несжимаемой жидкости, распространяющейся в неподвижной среде с теми же физическими свойствами и соударяющейся с плоской поверхностью. Чтобы применять имеющиеся в указанных работах выводы и зависимости, необходимо сформулировать ряд важных условий и допущений:

1. Средний размер пузырьков газа много меньше характерных расстояний, на которых изменяются макроскопические или осредненные параметры системы. Это дает возможность исследовать поведение одиночных пузырьков в сплошной среде (воде);

2. Средний размер пузырьков газа меньше ширины струи;

3. Групповая (коллективная) скорость всплывания пузырьков относительно жидкости много меньше средней скорости движения жидкости в поперечном сечении газожидкостной струи на начальном участке;

4. Турбулентные пульсации скорости движения пузырька во всех направлениях уравниваются друг друга, поэтому их влияние не учитывается;

5. Относительное газосодержание в струе (по объему) не превышает 5%, что не существенно влияет на профили продольной скорости в струе, на интенсивность расширения струи и позволяет применять расчетные зависимости, указанные в [1,2].

Важнейшими факторами, оказывающими влияние на скорость всплывания одиночного пузырька газа (воздуха) в жидкости, являются: ее вязкость, диаметр пузырька, поверхностное натяжение на границе жидкость-воздух, наличие ПАВ. При расчете скорости всплывания пузырька в затопленной газожидкостной струе необходимо дополнительно учитывать скорость втекания жидкости в струю. В случае горизонтальной пристеночной радиально-вверной струи указанная скорость будет направлена в сторону, противоположную скорости всплывания пузырька под действием силы Архимеда. Таким образом, фактическая скорость подъема пузырька будет результатом алгебраической суммы этих двух скоростей.

Скорость одиночного пузырька (U_0) диаметром 2-5 мм, всплывающего в турбулентном режиме, определяется по формуле [3]:

$$U_0 = \sqrt{\frac{\sigma}{R \cdot (\rho_{жс} - \rho_г)} + g \cdot R \cdot \left(1 - \frac{\rho_г}{\rho_{жс}}\right)}, \quad (1)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела вода-воздух, H/m^2 ; R – радиус пузырька, m ; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости (воды), $кг/м^3$; $\rho_в$ – плотность воздуха, $кг/м^3$.

Важнейшим фактором, оказывающим влияние на групповую скорость всплывания пузырьков воздуха в жидкости, является объемное газосодержание (φ), численно равное объему газа, содержащегося в единице объема газожидкостной смеси.

Групповая скорость всплывания пузырьков (U) в общем виде может быть представлена в виде:

$$U=U_0 \cdot F(\varphi), \quad (2)$$

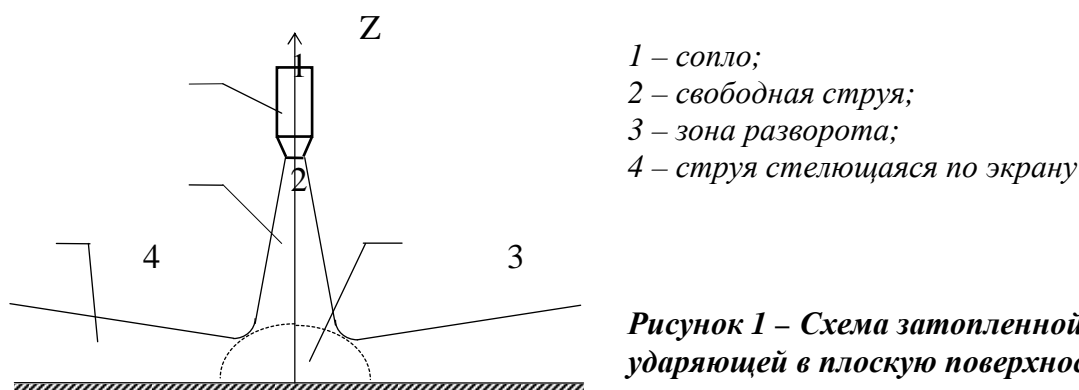
где U_0 – скорость всплывания одиночного пузырька; $F(\varphi)$ – функция, отражающая взаимное торможение пузырьков при их совместном всплывании.

Для пузырьков диаметром 2-5 мм, всплывающих в турбулентном режиме, допускается определять $F(\varphi)$ по формуле [4]

$$F(\varphi) = (1 - \varphi)^{n-1}, \quad (3)$$

где n – показатель степени, равный 1,5-2.

Схематически течение жидкости в рассматриваемом случае можно разбить на три области (рисунок 1): свободную струю, зону разворота и струю, стелющуюся по поверхности экрана.



Параметры течения в свободной струе вплоть до зоны разворота подчиняются обычным закономерностям. Течение в зоне разворота является сложным пространственным течением, которое отличается значительным изменением давления и большой кривизной линий тока. Эта зона имеет поперечный размер порядка диаметра свободной струи перед ее соприкосновением с плоской поверхностью. Движение струи по поверхности экрана носит радиальный характер, причем центром течения является точка пересечения оси свободной струи с плоскостью экрана. Таким образом, в третьей области имеет место затопленная пристеночная радиально-вверная струя.

Опытные данные были получены в ходе лабораторных исследований газожидкостных струй, содержащих пузырьки воздуха диаметром 2-3 мм. Температура воды во время опытов составляла 15,6°С, температура воздуха 17°С. Радиус сопла $R_0=6,75$ мм. Радиус пузырьков, принятый для расчетов, $R=1,5$ мм. Экспериментальные данные и полученный в результате расчета радиус образующейся области всплывающих га-

зовых пузырьков приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Экспериментальные данные и полученный в результате расчета радиус образующейся области всплывающих газовых пузырьков

Расстояние от среза сопла до щита $H, мм$	Расход воды $Q, дм^3/с$	Расход воздуха $q, дм^3/с$	Объемное газосодержание φ	Скорость жидкости на срезе сопла* $V_0, м/с$	Радиус вылета пузырьков (эксперимент) $r_э, мм$	Рассчитанный радиус вылета пузырьков $r_b, мм$	Ошибка интерполяции $\frac{r_b - r_э}{r_b} \cdot 100, \%$
80	0,344	0,018	0,049	2,40	80	81,0	1,20
	0,424	0,020	0,046	2,96	100	95,6	-4,70
	0,620	0,029	0,045	4,33	140	130,7	-7,09
	0,886	0,043	0,046	6,19	180	178,1	-1,08
	1,162	0,057	0,047	8,12	230	227,1	-1,29
60	0,321	0,015	0,046	2,24	70	76,8	8,90
	0,507	0,025	0,047	3,54	110	110,5	0,50
	0,716	0,035	0,046	5,00	160	148,3	-7,86
	0,930	0,047	0,048	6,50	180	186,5	3,49
	1,119	0,055	0,047	7,82	230	220,3	-4,30
40	0,488	0,025	0,048	3,41	100	107,8	7,23
	0,664	0,032	0,046	4,64	150	140,1	-7,04
	0,756	0,037	0,047	5,42	160	160,2	0,13
	0,902	0,044	0,047	6,30	180	183,0	1,62
	1,191	0,063	0,050	8,32	230	234,2	1,80
20	0,501	0,026	0,049	3,50	100	111,5	10,3
	0,812	0,043	0,050	5,69	160	168,6	5,10
	0,909	0,046	0,048	6,35	180	186,2	3,30
	1,178	0,058	0,047	8,23	230	235,0	2,15
10	0,404	0,020	0,048	2,82	100	94,6	-5,74
	0,664	0,033	0,047	4,64	140	143,0	2,13
	0,902	0,046	0,049	6,30	180	186,1	3,27
	1,178	0,061	0,049	8,23	230	236,1	2,57

* Примечание: Скорость жидкости на срезе сопла рассчитана так, как если бы пузырьки воздуха в ней отсутствовали.

Как видно из данных, приведенных в таблице 1, рассчитанный путем последовательного решения систем уравнений (в данной статье не приводится из-за ограниченности объема) радиус вылета пузырьков воздуха удовлетворительно совпадает с экспериментальными данными. Ошибка интерполяции лишь один раз превысила 10%, что является вполне удовлетворительным для инженерных расчетов, с учетом погрешностей измерений и принятых допущений.

Таким образом, приведенный алгоритм расчета может быть рекомендован для вычисления радиуса вылета газовых пузырьков при проектировании узла распределения рабочей жидкости, состоящего из сопла и отбойно-распределительного щита, а также других устройств, использующих принцип удара вертикальной затопленной газожидкостной струи о плоскую преграду.

Список использованных источников

1. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович, Т.А. Гиршович, С.Ю. Крашенинников [и др.]. – Изд. 2-е, перераб. и доп.; под ред. Г.Н. Абрамовича. – М.: Наука, 1984. – 716 с.
2. Секундов, А.Н. Исследование взаимодействия струи с близко расположенными экранами / А.Н. Секундов, О.В. Яковлевский // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. – 1964. – N1. – с.104-114.
3. Кутателадзе, С.С. Гидродинамика газожидкостных систем / С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.