

Выводы. В работе представлен численный алгоритм по определению величины тепловых потоков, идущих от параболоцилиндрического концентратора (ПЦК) на приёмник тепла, расположенный в его фокусе. Выявлены основные энергетические характеристики подобной системы для линейного и трубчатого приёмника тепла. Удовлетворительное совпадение результатов численного и экспериментального исследований подтверждает корректность данной методики и возможность её использования для теплоприемников различной геометрии, расположенных в фокальной и афокальной плоскостях ПЦК, точно ориентированного на Солнце.

Библіографічні посилання

1. www.ehorussia.ru/new/book/export/html/1307.
2. Cliff M. Webb SEGS Plant Design and Operation / M. Cliff. – Los Angeles. – 1989. – 42 p.
3. Клычев Ш.И. Методика расчёта системы параболоцилиндрический концентратор-трубчатый приёмник солнечных теплоэнергетических установок / Ш.И. Клычев, М.М. Мухитдинов, С.А. Бахрамов // Гелиотехника. – 2003. – №4. – С. 50–55.
4. Кныш Л.И. Применение метода статистических испытаний для расчёта облучённости приёмника тепла концентрированным потоком солнечной энергии / Л.И. Кныш, В.И. Давыдов // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Механіка. – 2009. – Вип. 13, т.1. – С. 51–59.
5. Мак-Клелланд Д. Концентраторы солнечного излучения для высокотемпературных установок КА. / Д. Мак-Клелланд // Энергетические установки космических аппаратов. – М., 1964. – С. 95–110.
6. Результаты испытаний солнечной параболоцилиндрической установки / И.И. Кохова, В.И. Кабаков, С.Ф. Эргашев, О.С. Дробязгина // Гелиотехника. – 1991. – №2. – С.14 – 16.

Надійшла до редакції 05.01.11

УДК 532.516

В.И. Елисеев*, Т.А. Рузова*, А.П. Толстопят*, Л.А. Флеер*,
А.Ф. Шевченко**, С.А. Шевченко**

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

**Институт черной металлургии НАН Украины

ДИНАМИКА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ ПРИ ПОДАЧЕ ГАЗОВОГО ПОТОКА ЧЕРЕЗ ВЕРТИКАЛЬНУЮ ЗАГЛУБЛЕННУЮ ФУРМУ

Наведено результати комп'ютерної обробки відеозображень коливної поверхні рідини при подаванні газового потоку через вертикальну заглиблену фурму. Отримано амплітудно-частотні характеристики коливального руху, значення характерних розмірів бульбашок і величини сплесків на поверхні рідини.

Ключові слова: вертикально заглиблена фурма, вдування газу в рідину, коливання вільної поверхні рідини при вдуванні газу.

Приведены результаты компьютерной обработки видеозображений колеблющейся поверхности жидкости при подаче газового потока через вертикальную заглибленную фурму. Получены амплитудно-частотные характеристики колебательного движения, значения характерных размеров пузырей и величин всплесков на поверхности жидкости.

Ключевые слова: вертикально заглибленная фурма, вдув газа в жидкость, колебания свободной поверхности жидкости при вдуве газа.

© В.И. Елисеев, Т.А. Рузова, А.П. Толстопят, Л.А. Флеер, А.Ф. Шевченко, С.А. Шевченко, 2011

The paper deals with the results of computer processing of video images of liquid oscillating surface when gas stream supplying through vertical sunken tuyere. There are received amplitude-frequency response of oscillatory motion, the values of bubbles characteristic dimension and splashes on liquid surface.

Key words: vertical sunken tuyere, supply of gas through free surface, oscillatory motion of free surface at a supply of a gas.

Введение. При продувке ванны с жидкостью газовым потоком на поверхности возникает волновое движение. Как правило, оно является нерегулярным и сопровождается некоторым общим подъемом жидкости, вследствие образования газовых пузырей в объеме, образованием разномасштабных волн, взаимодействующих друг с другом, и возникновением всплесков в виде как больших волновых образований, длинных тонких струй, так и отдельных капель, поднимающихся иногда на значительную высоту. Все эти качественные явления хорошо известны и многие детали волнового движения поверхностей описаны в многочисленных работах и монографиях, например, [1]. Однако только в последнее время, при развитии компьютерных технологий, связанных с обработкой видеоизображений, удается не только наблюдать, но и делать количественный анализ возмущенных поверхностей. Практический интерес к этим явлениям обусловлен многими проблемами, стоящими при разработке технологий в химической и металлургической отраслях промышленности. Основываясь на разработанной нами программе компьютерной обработки видеоизображений [2], ниже даются результаты такой обработки для случая подачи газового потока через вертикальную фурму в слой воды, находящейся в ванне. Такая схема является одной из широко используемых конструкций промышленных аппаратов для осуществления целого ряда известных технологических процессов.

Описание эксперимента и методика обработки. Авторами разработана компьютерная методика обработки видеоизображений применительно к процессу газожидкостных взаимодействий при заглубленном вдуве [2; 3], результаты использования которой представлены ниже.

Исследование проводилось на модели чугуновозного ковша, выполненной из органического стекла, геометрические параметры которого были: $H = 430$ мм, $D = 330$ мм.

В качестве рабочей жидкости использовалась вода с высотой налива $H_n = 300$ мм. Рабочим газом служил воздух, подаваемый через имитатор фурменного дутьевого устройства, заглубленного под уровень жидкости на величину $h_f = 200$ мм. Имитатор фурменного дутьевого устройства – трубка, которая имела следующие параметры: $d_n = 3$ мм; $d_{nn} = 2$ мм; $d_c = 2.0$ мм, 1.8 мм, 1.6 мм, 1.4 мм. Угол отклонения дутья от оси трубки: $\alpha = 0^\circ; 45^\circ; 90^\circ$.

Газ, подаваемый на сопло фурменного устройства, последовательно проходил через регулирующий вентиль, манометр и батарею параллельно соединенных ротаметров. Показания ротаметров корректировались с учетом показаний манометра, а величина скорости газа, истекающего из сопла фурменного устройства, рассчитывалась по данным датчика полного давления (трубка Пито), устанавливаемого на срезе сопла при предварительной проводимой тарировке.

Поскольку величины значений расхода газа и скорости его на срезе сопла, при которых проводились эксперименты, определялись не напрямую, а расчетом по измеренным параметрам, то режимы продувки задавались и регистрировались по показаниям манометра. Показания эти измерялись в интервале $0.1 \div 1.5$ ати. Расход газа изменялся в диапазоне $0.3 \div 2.2$ м³/ч. По этой причине величины расходов газа в разных сериях опытов не совпадают.

В указанном интервале расхода газа (Q) задавались $6 \div 8$ значений (примерно с равным интервалом) этой величины, при которых исследовалось видеоизображение процесса газожидкостного взаимодействия.

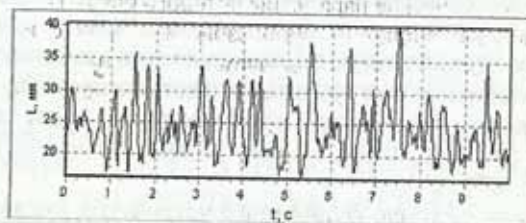
Видеозапис велась на цифрову відеокамеру VPC-HD1000 з затвором $\sim 1/10000$ і частотою $1/60$ кадр/сек в проходящем світлі — джерелі світла, модель ковша і об'єктив камери розміщались на одній осі.

Видеозапис кожного режиму процесу проводилась в теченні 10 с., за котрі реєструвалось 600 кадрів процесу.

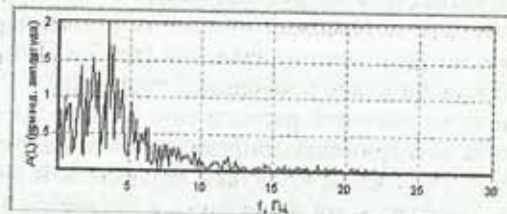
Отримані матеріали по кожному з режимів далі піддавались комп'ютерній обробці по спеціальній програмі обробки відеоізображень.

Результати аналізу. На рис. 1,а і 2,а показані криві зміни в часі середньої величини поверхні шару рідини, з котрих видно, що характер цього зміни статистичний. Для виявлення частотних особливостей руху поверхні використовується швидке перетворення Фур'є, що дозволяє визначити основні частоти цього коливаючого руху [4]. Методика швидкого перетворення Фур'є отримала в останнє час широке застосування завдяки хорошій точності і швидкості розрахунку частотних характеристик. Швидкість розрахунку досягається обрізанням високих частот (смажуванням) і, відповідно, зменшенням кількості членів в рядах.

На рис. 1,б і 2,б показані амплітудно-частотні характеристики коливань поверхні, що відповідають рис. 1,а і 2,а. З рисунків видно, що переважаючими частотами коливань поверхні є досить низькі величини, що важливо, як для аналізу досліджуваного явища, так і для оцінки його точності. Тут важливим аспектом є те, що порівняно великі амплітуди приходяться на частоти, що лежать в першій половині розглянутого інтервалу частот. Наші тестові оцінки показали, що точність величин амплітуд, що знаходяться в цій половині достатньо висока (похибка становить менше 1 %). При переході во вторую половину точність падає і до кінця розглянутого інтервалу похибка значно збільшується. Для більш точного розрахунку необхідно збільшувати кількість членів рядів Фур'є.

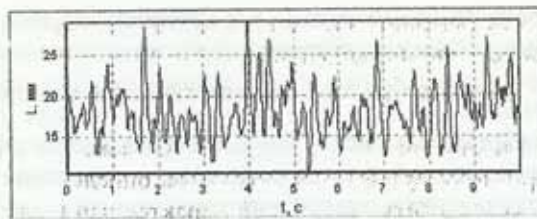


а

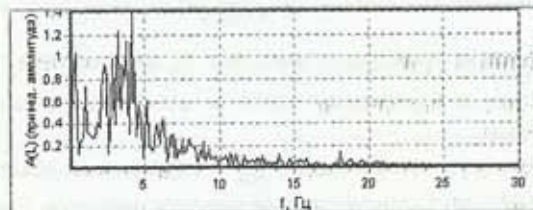


б

Рис. 1. Поверхність шару рідини (а) і її амплітудно-частотна характеристика (б): $Q=2,2$ м³/ч; $d=2,0$ мм; $\alpha=0^\circ$



а



б

Рис. 2. Поверхность слоя жидкости (а) и ее амплитудно-частотная характеристика (б): $Q=1,1$ м³/ч; $d=2,0$ мм; $\alpha=0^\circ$

Таким образом, выбранное количество членов в преобразовании и сам частотный интервал позволяет достаточно быстро найти основные характерные особенности, которые представляют интерес для анализа. Как следует из приведенных рисунков, амплитудно-частотные кривые имеют ярко выраженные пики, причем среди них выделяются максимальные, соответствующие некоторой частоте. Анализ многочисленных экспериментов показал, что и величина пика и его соответствие частоте связано с расходом подаваемого газа. Если предположить, что частота максимального пика соответствует некоторому периодическому, точнее квазипериодическому движению, то можно получить оценку этого характерного движения. Таким квазипериодическим движением является выход пузыря или ансамбля пузырей из слоя жидкости. Оценки собственных колебаний жидкости с найденными величинами газосодержания указывают на то, что частота этих колебаний на порядок выше. Таким образом, определяется временная зависимость выхода пузырей, и, соответственно этому, может быть определен важный линейный размер – характерный масштаб некоторого осредненного пузыря.

Определению характерного размера пузырей при барботировании ванны, вследствие важности этой величины, посвящено значительное количество работ, например [5; 6]. В основе определения ее лежит теория устойчивости, разработанная Рэлеем [7] для изучения распада струй капиллярной жидкости. Использование этой теории для получения величин диаметров отрыва пузырей также нашло широкое применение в многочисленных работах, например [8]. Однако, количественная сторона процесса наталкивается здесь на ряд сложностей, связанных с физическими особенностями течения: ограниченностью пространства, значительной нелинейностью процесса, многофакторностью (возмущением поверхности жидкости, существенной вынужденной конвекцией, влиянием газового тракта). Полученная нами амплитудно-частотная характеристика колебания поверхно-

сти, дает возможность реальной оценки осредненного характерного размера пузыря. Считая процесс квазипериодическим с некоторым средним периодом $T = 1/f_{max}$ (f_{max} – значение частоты, соответствующей максимальной амплитуде на кривых, представленных на рис. 1, б и 2, б), примем, что это время равно времени надувания отрывного пузыря при некотором определенном объемном расходе газа Q , тогда легко получить следующий характерный радиус пузыря

$$r_p = \left(\frac{3}{4\pi} \frac{Q}{f_{max}} \right)^{1/3}. \quad (1)$$

Ниже в таблицах приведены значения r_p для различных расходов газа, заданных в эксперименте, и определены частоты, отвечающие максимальным амплитудам при этих расходах.

Из таблиц следует, что частоты f_{max} с изменением объемного расхода изменяются в целом немонокотонно – видна стохастичность процесса. Однако радиус пузыря с ростом расхода газа увеличивается довольно четко. Таким образом, частотный анализ колебания поверхности слоя жидкости позволяет определить характерный размер пузыря, что является важным моментом для изучения массообменных процессов. Преимуществом этого метода является сравнительно большая доступность получения информации о проходящем в реальных условиях процессе.

Таблица 1

Зависимость частоты и радиуса пузыря от расхода ($d=1,4$ мм; $\alpha=0^\circ$)

Q (м ³ /ч)	2.04	1.82	1.58	1.32	1.02	0.65	0.49	0.33
f_{max} (Гц)	3.85	3.3	2.2	2.0	3.38	2.38	3.15	2.93
r_p (м)	0.053	0.051	0.049	0.044	0.042	0.036	0.033	0.029

Таблица 2

Зависимость частоты и радиуса пузыря от расхода ($d=1,4$ мм; $\alpha=45^\circ$)

Q (м ³ /ч)	2.12	1.87	1.59	1.25	0.79	0.50	0.33
f_{max} (Гц)	2.86	2.1	1.5	1.52	2.0	3.05	2.55
r_p (м)	0.037	0.039	0.041	0.032	0.029	0.022	0.02

Таблица 3

Зависимость частоты и радиуса пузыря от расхода ($d=2,0$ мм; $\alpha=0^\circ$)

Q (м ³ /ч)	2.19	2.0	1.82	1.51	1.3	0.87	0.56	0.31
f_{max} (Гц)	3.5	3.05	3.5	3.53	3.3	4.13	2.76	2.60
r_p (м)	0.035	0.035	0.031	0.031	0.030	0.024	0.023	0.020

Таблица 4

Зависимость частоты и радиуса пузыря от расхода ($d=2,0$ мм; $\alpha=45^\circ$)

Q (м ³ /ч)	1.95	1.74	1.55	1.31	0.87	0.56	0.31
f_{max} (Гц)	1.52	3.50	2.35	3.40	3.20	3.00	1.50
r_p (м)	0.044	0.032	0.035	0.029	0.026	0.023	0.024

Еще одним важным аспектом наблюдения поверхности и обработки видеоизображений, на наш взгляд, является определение величин подъема всплесков. Под всплеском понимается максимальный подъем жидкости, зафиксированный на каждом конкретном снимке поверхности. При рассмотрении всплесков определялись фактически два параметра: максимальный подъем струйки над поверхностью жидкости в серии снимков и ее вероятность в данной серии. Серия из N видеоизображений характеризовалась определенными значениями диаметра сопла и расхода газа. Для каждого кадра определялся всплеск. Статистический анализ проводился по известной схеме [9; 10]: весь диапазон всплесков разбивался на m интервалов. Для каждого интервала j определяется частота N_j – число всплесков, попавших в заданный интервал, при этом $\sum_{j=1}^m N_j = N$. Тогда вероятность попадания величины всплеска в заданный интервал (более правильно – частость) определяется по формуле

$$w_j = N_j / N, \quad j = \overline{1, m}, \quad \left(\sum_{j=1}^m w_j = 1 \right). \quad (2)$$

На рис. 3 показаны кривые наиболее вероятных значений всплесков от подаваемого расхода Q . Из рисунков видно, что, несмотря на немонотонный характер кривых, просматривается явная зависимость этих величин от расхода. Более того, несложно заметить, что с ростом расхода высота наиболее вероятных всплесков увеличивается. Такой же характер просматривается и для максимальных всплесков, найденных в каждой серии обрабатываемых снимков, кривые которых приведены на рис. 4.

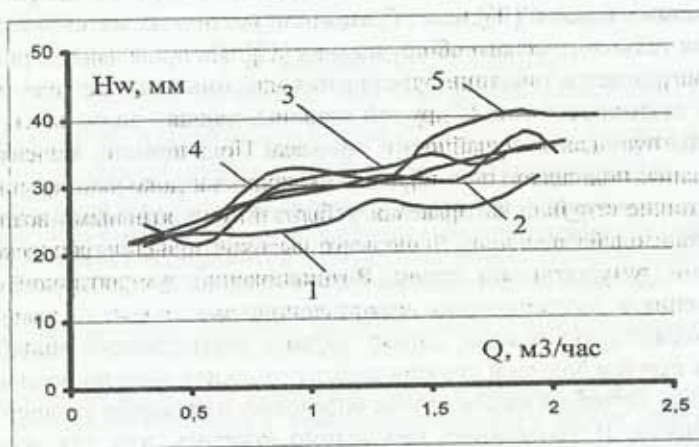


Рис. 3. Зависимость наиболее вероятного всплеска H_w от расхода газа Q :

1 – $d_c = 1.4$ мм, $\alpha = 45^\circ$;

2 – $d_c = 1.6$ мм, $\alpha = 45^\circ$;

3 – $d_c = 1.8$ мм, $\alpha = 45^\circ$;

4 – $d_c = 2.0$ мм, $\alpha = 45^\circ$;

5 – $d_c = 2.0$ мм, $\alpha = 0^\circ$

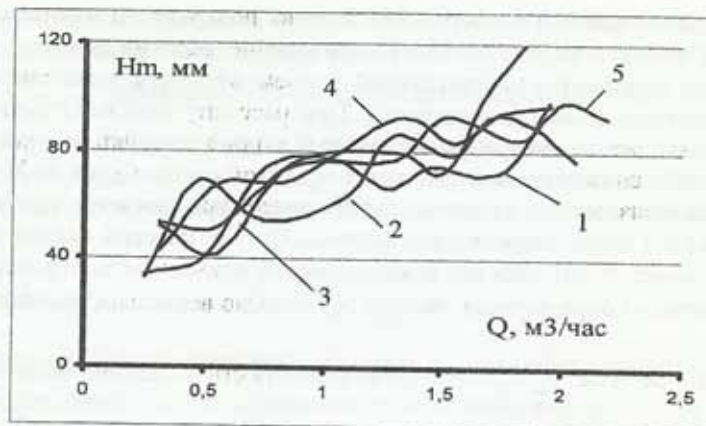


Рис. 4. Зависимость максимальных значений всплесков H_m от расхода газа Q :

1 – $d_c = 1.4$ мм, $\alpha = 45^\circ$;

2 – $d_c = 1.6$ мм, $\alpha = 45^\circ$;

3 – $d_c = 1.8$ мм, $\alpha = 45^\circ$;

4 – $d_c = 2.0$ мм, $\alpha = 45^\circ$;

5 – $d_c = 2.0$ мм, $\alpha = 0^\circ$

Сравнивая величины всплесков на рис. 3, 4, не трудно видеть, что наиболее вероятные примерно в половину меньше максимальных, а значения максимальных величин достаточно существенны. Это объясняет явления выбросов, например, металла из обрабатываемых ковшей [11], или образований различных металлических наслоений на деталях технологического оборудования [12]. На приведенном рисунке также хорошо просматривается тенденция увеличения максимальных всплесков с увеличением расхода подаваемого газа. С другой стороны, хорошо видна хаотичность кривых, свидетельствующая о случайности процесса. Под понятие всплески, графики которых показаны, подпадают при обработке кадров как довольно крупный подъем волны, так и тонкие струйки, которые могут быть и кумулятивными возникающими в результате взаимодействия волн. Чаще всего высокие значения всплесков соответствуют, видимо, кумулятивным струям. Возникновение кумулятивной струи, скорость ее движения и, соответственно, высота ее подъема зависят от локальных параметров взаимодействующих волн, однако, видимо, статистически общий рост длин кумулятивных струй в большой степени зависит от общей энергии волнового движения поверхности, которая в нашем случае определяет положение средней линии волновой поверхности. В заключение, необходимо отметить, что, как представляется авторам, показанные результаты и выбранное направление работ, связанных с динамикой поверхностей слоев жидкостей в технологических аппаратах, в дальнейшем, дадут возможность получить интересные и важные для практики сведения.

Бibliографические ссылки

1. Сретенский Л. Н. Теория волновых движений жидкости / Л. Н. Сретенский. – М., 1977. – 816 с.

2. Рузова Т. А. Компьютерная обработка кинограмм процесса взаимодействия газовых струй с жидкостью / Т. А. Рузова, А.П. Толстомят, А.Ф. Шевченко, С.А. Шевченко // Наук. вісник Нац. гірнич. ун-ту. – 2007. – № 12. – С. 91–96
3. Рузова Т.А. Компьютерная обработка видеоизображений газовых пузырей в жидкости / Т.А. Рузова, В.И. Елисеев, А.П. Толстомят, Л.А. Флер. // Оптические методы исследования потоков : Труды IX междунар. научно-технич. конф. – М., 2007. – С.48–49.
4. Numerical Recipes In C : The Art Of Scientific Computing / W.H. Press, B.P. Flannery, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling. – Cambridge University Press, 1993. – 967 p.
5. Явойский В.И. Теория продувки сталеплавильной ванны / В.И. Явойский, Г.А. Дорофеев, И.А. Повх. – М., 1974. – 495 с.
6. Охотский В.Б. Физико-химическая механика сталеплавильных процессов / В.Б. Охотский. – М., 1993. – 151 с.
7. Рэлей Дж. В. Теория звука. Т. II. / Дж. В. Рэлей. – М.-Л., 1944. – 476 с.
8. Левич В.Г. Физико-химическая гидромеханика / В.Г. Левич. – М., 1959. – 670 с.
9. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л., 1985. – 248 с.
10. Рудзит Я.А. Основы метрологии, точность и надежность в приборостроении / Я.А. Рудзит, В.Н. Плуталов. – М., 1991. – 304 с.
11. Бойченко Б.М. Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкция аппаратов, рециркуляция металлов и экология / Б.М. Бойченко, В.Б. Охотский, П.С. Харлашин. – Дніпропетровськ, 2006. – 454 с.
12. Елисеев В.И. О возможных причинах попадания расплава металла внутрь дутьевого канала фурмы / В.И. Елисеев, А.П. Толстомят, Л.А. Флер // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Механіка. – 2006, № 2/1. – С. 106–112.

Надійшла до редколегії 08.11.10

УДК 532.516

В.И. Елисеев, В.В. Давидсон

Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

ИОНООБМЕН В ДИСПЕРСИОННЫХ СРЕДАХ, НАХОДЯЩИХСЯ В ПОЛЕ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

У рамках теорії іонообміну розглянуто завдання про розповсюдження електричного струму в гетерогенних середовищах, що складаються з твердих пористих тіл і рідких електролітів. На основі виконаних експериментів і теоретичних рішень отримані залежності амплітуд реактивних і активних струмів від частоти і величини напруги, що подається.

Ключові слова: дисперсні середовища, іонообмін, змінний струм в гетерогенних середовищах, залежність струму від частоти і амплітуди напружень.

В рамках теории ионообмена рассмотрена задача о распространении электрического тока в гетерогенных средах, состоящих из твердых пористых тел и жидких электролитов. На основе выполненных экспериментов и теоретических решений получены зависимости амплитуд реактивных и активных токов от частоты и величины подаваемого напряжения.

Ключевые слова: дисперсные среды, ионообмен, переменный ток в гетерогенных средах, зависимость тока от частоты и амплитуд напряжений.

The problem of electric alternating current propagation in heterogeneous mediums consisting of solid porous bodies and liquid electrolytes is considered in terms of ion interchange theory. On the basis of experiments and theoretical solutions dependences of active and reactive current amplitudes from frequencies and supplied voltage have been received.