

А.Л. ЛУКС
Е.А. КРЕСТИН
А.Г. МАТВЕЕВ
А.В. ШАБАНОВА
А.И. КИТАЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ВСПЛЫТИЯ ПУЗЫРЯ ГАЗА В ПРОЦЕССЕ БАРБОТАЖА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

*RATE OF GAS (VAPOR) BUBBLE FLOATING UP DURING THE PROCESS OF BUBBLE AERATION
AT DIFFERENT MODES*

Исследуются скорости свободного всплытия пузырей при вязком режиме. При всплытии пузырьки рассматриваются как квазитвердая сфера, а всплытие происходит по закону Стокса. Скорости всплытия найдены с учетом деформации пузырей от сферической к грибообразной. Гидродинамические параметры определены при квадратичном законе сопротивления всплытия крупных пузырей, а также при медленном истечении газа в непроточный объем жидкости из отверстия. Произведен анализ влияния геометрии каналов на скорость всплытия пузырей. Для обработки экспериментальных данных использованы полумпирические методы теории подобия.

Ключевые слова: *скорость всплытия, пузырь, вязкость, деформация, режим, турбулентность.*

Турбулентность – основная форма движения жидкости и газообразных сред в технологических аппаратах [1–6]. Для технологических процессов барботажа наибольшее значение имеет исследование пристенной турбулентности, которая порождается отрывом потока и приводит к изменению формы пузырей [7–12].

Наиболее распространенный способ развития межфазной поверхности раздела фаз – барботаж. При барботаже газ (пар) через отверстия в распределительных устройствах переходит в жидкое состояние и диспергируется в ней в виде отдельных пузырей. Такие газожидкостные системы образуются, например, в тарельчатых массообмен-

Speeds of free emersion of bubbles (the viscous mode of emersion) are investigated, at emersion of bubbles as quasifirm sphere under Stokes's law. Emersion speeds at deformations of bubbles from spherical to griboobrazny are considered; at the square law of resistance of emersion of large bubbles, at the slow expiration of gas in the landlocked volume of liquid from an opening. Influence of geometry of channels on the speed of emersion of bubbles is analyzed. For processing of experimental data semi-empirical methods of the theory of similarity are used.

Keywords: *emerging speed, bubble, viscosity, deformation, mode, turbulence.*

ных аппаратах (абсорберах, ректификационных колоннах и др.).

Подъем паровой фазы в жидкости называется барботажем пара через жидкость. Он наблюдается в барабанах паровых котлов, парогенераторах атомных станций, кипящих реакторах, испарителях, выпарных аппаратах, ректификационных колоннах и др.

Гидрогазодинамические смеси образуются в процессах барботажа в случае, когда газ проходит через слой непроточной жидкости. При этом скорость всплытия пузыря и возникающее гидродинамическое сопротивление в жидкостях разного рода значительно зависят от режима смачивания и ряда других факторов. При движении пузырей

наблюдается их деформация и переход от сферической формы к грибообразной. На этот процесс влияют как скорость всплытия пузыря, так и гидродинамическое сопротивление. При этом наблюдается интенсивное перемешивание и турбулизация пристенного слоя жидкости (рис. 1).

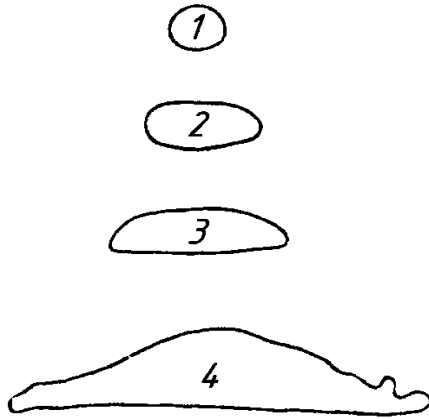


Рис. 1. Форма и размер пузырей:

1 – до 1,5 мм; 2 – 1,5 – 5 мм; 3 – 5 – 25 мм; 4 – 50 мм и более

Разнообразие форм пузырей, режимов, гидродинамические и геометрические параметры каналов определяют важность создания единой методики расчета процесса барботажу путем исследования всплытия одиночного пузыря, опираясь при этом на надежные экспериментальные результаты и имеющиеся полуэмпирические критериальные зависимости. Такой подход позволит выявить объемную картину всплытия пузыря и режимы работы процессов и аппаратов. Затем перенести эти результаты при определенных условиях на барботаж в технологических процессах аппаратов.

При обработке экспериментальных данных используются характерные масштабы и числа подобия: эквивалентный радиус $R=(3V/4\pi)^{1/3}$; линейный масштаб капиллярно-гравитационного взаимодействия:

$$\delta_{\sigma g} = \left(\frac{\sigma}{g\Delta\rho} \right)^{1/2}; Re = U''R/\nu';$$

$$Ar = g \overline{\Delta\rho} R^3/\nu'^2; \overline{\Delta\rho} = \Delta\rho/\rho'; \overline{R_{\sigma g}} = R/\delta_{\sigma g};$$

$$\overline{U}'' = U''(g\overline{\Delta\rho}R)^{-1/2},$$

где V – объем пузыря, м³; σ – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела фаз,

ν' – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м²/с; $\Delta\rho = \rho' - \rho''$ – разность плотностей взаимодействующих сред; индексы ' и '' означают соответственно жидкую или газовую (паровую) фазы.

Критерием гравитационно-капиллярно-вязкостного взаимодействия является модифицированное число Архимеда $Ar^* = g\delta_{\sigma g}^3 \overline{\Delta\rho}/\nu'^2$.

Скорость свободного всплытия пузыря μ'' определена при $Re < 1$ ($Ar < 4,5$) формулой Адамара-Рыбчинского

$$\overline{U}'' = 2Ar^{1/2} \frac{1 + \overline{\mu}}{6 + 9\overline{\mu}}, \quad \overline{\mu} = \overline{\mu}''/\overline{\mu}', \quad (1)$$

где $\overline{\mu}''$ и $\overline{\mu}'$ – коэффициенты динамической вязкости газа (пара) и жидкости, Па·с.

Микропримеси упрочняют границу раздела фаз. Поэтому пузырек всплывает как квазитвердая сфера. По закону Стокса

$$\overline{U}'' = \frac{2}{9} Ar^{1/2} \quad (2)$$

при $4,5 < Ar < 100$ $\overline{U}'' \approx 1,4R\sigma g^{-5/6}$; скорость всплытия определяется формулой Пиблса-Гарбера

$$U'' = \frac{1}{3} Ar^{1/4}; \quad (3)$$

а при $Ar > 2000$ $R_{\sigma g}$ – формулами

$$\overline{R_{\sigma g}} < 1,5; \overline{U}'' \approx 1,4R\sigma g^{-5/6};$$

$$\overline{R_{\sigma g}} > 2; U'' \approx 1; \quad (4)$$

в области $1,5 < R_{\sigma g} < 2$ – формулой Франк-Каменецкого

$$U'' \approx 1,3\overline{R_{\sigma g}}^{-1/2}. \quad (4a)$$

Экспериментальная зависимость $U'' = f(Re)$ показана на рис. 2. Левая восходящая кривая соответствует вязкому режиму всплытия. Она описывается формулами (2) и (3). Нисходящая часть кривой соответствует деформации пузырей от сферической формы к грибообразной и описывается первой формулой (4). Область минимума коррелируется формулой (5). Правая восходящая часть кривой соответствует квадратичному закону сопротивления всплытия крупных пузырей. Для ее описания пригодна формула (4a). Существуют, хотя и узкие, пе-

реходные зоны от одной кривой к другой, которые требуют уточнения и тщательных экспериментов, так как в них обнаруживается некоторый разброс данных (см. рис. 2).

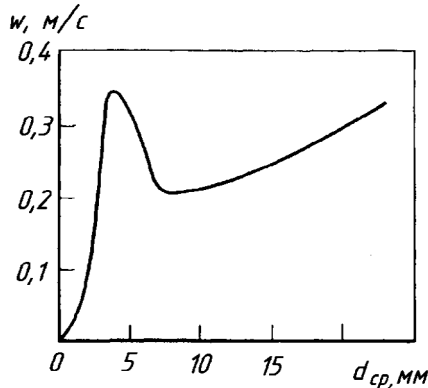


Рис. 2. Зависимость скорости всплытия в воде одиночного пузыря от его размера при $p=10^5$ Па.

При всплытии одиночного пузыря в цилиндрической трубе с непроточным слоем жидкости оказывает влияние геометрия: соотношение эквивалентного радиуса пузыря R и радиуса канала R_k :

$$\bar{U}''(Ar^*, \bar{R}_{\sigma g}, \bar{R}_k), \text{ где } Ar^* = g \delta^3 \Delta \rho / \nu^2; \quad \bar{R}_k = R_k / \delta_{\sigma g} \quad (5)$$

При движении пузыря в плоскопараллельном щелевом канале шириной δ_k по экспериментальным данным В.А. Григорьева и Ю.И. Крохина получены формулы

$$Re = U'' \delta_k / \nu' > 200; \quad \bar{\delta}_k = \frac{\delta_k}{\delta_{\sigma g}} < 0,23;$$

$$U'' = 6,2g \left(\frac{\Delta \rho}{\sigma} \delta_k^3 \right)^{1/2}; \quad \bar{\delta}_k > 0,23; \quad U'' = 1,5 \left(g \bar{\Delta} \rho \delta_k \right)^{1/2} \quad (6)$$

Для клиновидного канала с углом раскрытия α вводятся эффективные значения ускорения

$$g_\alpha = g + 1,85 \sigma t g \alpha / (\Delta \rho \delta_k^2).$$

Опытные данные соответствуют $R > 10 \delta_k$. В этом случае пузыри крупные, имеют вытянутую форму и сильно тормозятся стенками канала (комплекс $Ar > 10^8$).

При медленном истечении газа в непроточный объем жидкости из отверстия отрывной радиус пу-

зыря при барботаже по Н.И. Смирнову и С.Е. Полюте описывается зависимостью

$$R = \left[1,14 - 126 \left(\frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \right)^{0,95} \right] \left(\frac{\sigma R_1}{g \rho'} \right)^{1/3}, \quad (7)$$

где R_1 – радиус отверстия [3].

Устойчивая газовая подушка под горизонтальным дырчатым листом возникает, когда медленная скорость истечения через отверстие не превышает

$$U_m'' \geq 1,2 \rho''^{-1/2} (g \Delta \rho \sigma)^{1/4} \left(\frac{\sigma}{g \Delta \rho R_1^2} \right)^{1/2} \quad (8)$$

Среднее газосодержание толстого барботируемого газом слоя маловязкой жидкости оценивается по формуле

$$\phi < 0,7: \quad \bar{\phi} \approx c \bar{\rho}^{-0,15} \left(U_m'' \sqrt{\frac{\Delta \rho}{g \sigma}} \right)^{0,7} \quad (9)$$

По экспериментальным данным Биргера (диаметр барботажной колонны $D_6 = 82$ мм) и С.М. Мочана ($D_6 = 76$ мм) $C = 0,4$; по экспериментальным данным Т.Х. Маргуловой ($D_6 = 216$ мм) $C = 0,26$; по данным, обработанным А.М. Кутеповым, Л.С. Стерманом и Н.Г. Стюшиным, при соотношениях

$$D_\sigma < 260 \bar{\rho}''^{0,2} \delta_{\sigma g} \quad C = 1,1 \left(\frac{D_\sigma}{\delta_{\sigma g}} \right)^{0,25}; \text{ при}$$

$D_\sigma > 260 \bar{\rho}''^{0,2} \delta_{\sigma g}$ $C=0,26$ показатель степени при $\bar{\rho}''$ в формуле (9) равен приблизительно 0,12.

Основная характеристика гидродинамики водяного объема при барботаже – истинное объемное паросодержание ϕ . По мере продвижения пара к поверхности раздела фаз скорость его изменяется. Соответственно изменяются и локальные значения ϕ . Для выравнивания скоростей пара в барботажном слое и в паровом пространстве над греющими элементами устанавливают распределительное устройство – дырчатый лист. Как любая преграда, он обладает гидравлическим сопротивлением. Поэтому в листе подбирается определенное количество отверстий. Дырчатые листы гасят кинетическую энергию пароводяных струй. Поэтому над ними устанавливается более спокойный уровень.

Типичное распределение истинных паросодержаний по высоте барботажного слоя показано в

[5, рис. 3.1]. По высоте слоя выделяются три зоны. В первой зоне, которая расположена непосредственно после дырчатого листа, паросодержание изменяется от начального, определяемого площадью отверстий, до некоторого значения φ . Во второй зоне паросодержание не изменяется; в третьей зоне изменяется от значения φ , характерного для второй зоны, до $\varphi=1$. Вторая зона – стабилизированный участок распределения паросодержания по высоте барботажного слоя, третья – переходная зона. В ней пар почти полностью отделяется от жидкости и образует однофазный паровой поток. Пар захватывает жидкие капли, но их унос очень мал и его в расчете не учитывают.

В первой зоне движение пузырей вызывается не только подъемной силой, но и напором жидкости над листом. Во второй зоне наступает безнапорное движение, обусловленное действием только подъемной силы. При подходе к поверхностным слоям движение пузырей затормаживается действием силы поверхностного натяжения. Поэтому паросодержание φ в поверхностном слое плавно увеличивается.

Когда скорость пара не слишком велика, то он протекает через отверстия отдельными пузырями. В процессе образования и роста парового пузыря у отверстия на него действуют подъемная сила и конвективные токи. Они стремятся оторвать пузырь от листа. Однако силы поверхностного натяжения препятствуют этому. Если пренебречь вязкостью жидкости и влиянием конвективных токов, то справедливо соотношение

$$4/3\pi R_0^3 g(\rho' - \rho'') = 2\pi R_1 \sigma, \quad (10)$$

где R_0 – радиус пузыря в момент отрыва; R_1 – радиус отверстия; σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Из последнего уравнения вычисляем отрывной радиус пузыря:

$$R_0 = \sqrt[3]{3R_1 \sigma / [2g(\rho' - \rho'')]}. \quad (11)$$

Это уравнение действительно, когда диаметр отверстия небольшой и радиус пузыря R_0 при отрыве больше радиуса отверстия R_1 . При больших значениях R_1 уравнение (11) недействительно.

Работа парораспределительного листа рассмотрена С.С. Кутателадзе [5]. Энергия L , расходуемая на образование пузыря, затрачивается на обра-

зование свободной поверхности и преодоление сопротивлений перемещению пузыря во время его роста:

$$L = L_\sigma + L_F, \quad (12)$$

где L_σ и L_F – энергия (работа), затрачиваемая на образование свободной поверхности и преодоление сопротивлений соответственно.

На образование пузыря расходуется кинетическая энергия пара, втекающего в него за время его формирования τ_1 :

$$L = \int_0^{\tau_1} (\rho'' \omega_1^2 / 2) \pi R_1^2 \omega_1 d\tau. \quad (13)$$

Энергия, затраченная на образование свободной поверхности, равна

$$L'_\sigma = 4\pi R_1^2 \sigma. \quad (14)$$

Из уравнения сохранения массы

$$\pi R_1^2 \rho \omega_1 d\tau = \rho'' 4\pi R^2 dR$$

$$\omega_1 = 4(R/R_1)^2 (dR/d\tau). \quad (15)$$

При $dR/d\tau = C_\tau^m$ имеем

$$\omega_1 = \frac{4C_\tau^2}{R_1^2(m+1)^2} \tau^{3m+2}. \quad (16)$$

$$\text{Тогда } R = C_\tau^{m+1} / (m+1), \quad (17)$$

$$C = (m+1) R_0 / \tau^{m+2}. \quad (18)$$

При равенстве значений $\tau = \tau_1$ радиус пузыря R становится равным R_0 .

В конструкциях паровых котлов, парогенераторов, испарителей в качестве парораспределительных устройств применяют дырчатые листы с диаметром отверстий не менее 8–12 мм. Такие устройства при скоростях пара ω'' рассчитываются по формуле

$$\frac{\overline{\omega_{\min}}'' \sqrt{g\rho''}}{\sqrt[4]{g^3(\rho' - \rho'')}} = 1,25^{12} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'') R_1^2}}, \quad (19)$$

где $\overline{\omega_{\min}}''$ – минимальная скорость, соответствующая непрерывному истечению пузырей.

Когда диаметр отверстия выше среднего диаметра пузырей, барботирующих через жидкость под листом и над ним, то паровая подушка образуется при слиянии пузырей. Тогда через отверстия листа будет протекать пар в виде сплошного потока.

Зависимость среднего объемного паросодержания при различных режимах и давлениях (от 0,1 до 18,6 МПа) в критериальной обработке была установлена Л.С. Стерманом. Им была найдена зависимость в виде:

$$\varphi = 1,07 \left(\frac{\omega_0^2}{g \sqrt{\sigma/g(\rho' - \rho'')}} \right)^{0.36} \sqrt{\frac{\sigma/g(\rho' - \rho'')}{d^{0.25}}} (\rho''/(\rho' - \rho''))^{0.17} \quad (20)$$

Для расчета минимальной скорости пузыря пара Л.С. Стерманом была получена более удобная формула $\omega_{\min}'' = 2,44 \sqrt{\sigma/\rho''} R_0$. (21)

Для одних и тех же значений R_0 скорость, при которой образуется паровая подушка под листом при истечении пара через отверстие листа отдельными пузырями, будет в 1,92 раза ниже скорости при истечении пара сплошной струей. В этом случае для определения значений ω_{\min}'' необходимо располагать параметрами R_0 .

Анализ показывает, что наибольший диаметр аппарата, при котором учитывается воздействие стенок на процесс барботажа, определяется по формуле

$$d_{\text{пр}} = 260 \left[\rho''/(\rho' - \rho'')^{0.2} \right] \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}} \quad (22)$$

Когда $d > d_{\text{пр}}$, то объемное паросодержание ϕ определяется Л.С. Стерманом:

$$\phi = 0,26 \left(\frac{\omega_0^2}{g \sqrt{\sigma/g(\rho' - \rho'')}} \right)^{0.36} \left(\frac{\rho}{\rho' - \rho''} \right)^{0.12} \quad (23)$$

При свободном барботаже газ с небольшим расходом проходит через слой жидкости в виде отдельных пузырьков. В случае свободного всплывания диаметр пузыря d_n приближенно рассчитывают по простой формуле

$$d_n = \sqrt[3]{\frac{6d_0\sigma}{g(\rho' - \rho'')}} = \sqrt[3]{\frac{6d_0\sigma}{g\Delta\rho'}} \quad (24)$$

где d_0 – диаметр отверстия, в котором образуется пузырь; $\Delta\rho = \rho' - \rho''$ – перепад плотностей взаимодействующих сред; σ – поверхностное натяжение на границе раздела жидкой и газовой фаз.

Число пузырьков, образующихся при прохождении через отверстие в единицу времени, находят по соотношению

$$n = \frac{6Q}{\pi d_n^3}, \quad (25)$$

где Q – объемный расход газа.

При цепном барботаже диаметр пузыря рассчитывают по следующим формулам:

для ламинарного движения

$$d_n = \sqrt[4]{\frac{108\mu'Q^2}{\pi g(\Delta\rho)'}} \quad (26)$$

для турбулентного движения

$$d_n = \sqrt[5]{\frac{72\rho'Q^2}{\pi g(\Delta\rho)'}} \quad (27)$$

Критическое значение числа Рейнольдса для всплывающего пузыря, при котором наблюдается переход от ламинарного к турбулентному режиму, равно 9. Само число Рейнольдса определяется по выражению

$$\text{Re}_n = \frac{U'' d_n \rho'}{\mu'}, \quad (28)$$

где U'' – скорость всплывания пузыря рассчитывается по упрощенной методике:

для ламинарного движения

$$U'' = \frac{d_n^2 \Delta\rho g}{18\mu''} \quad (29)$$

для турбулентного движения

$$U'' = 0,7 \sqrt{\frac{d_n \Delta\rho g}{\rho'}} \quad (30)$$

Критическое значение расхода газа, при котором свободный барботажа заменяется цепным, находят по упрощенной методике расчета:

для ламинарного движения

$$Q_{\text{кр}} = \sqrt[3]{\frac{0,03\sigma^4 d_0^4}{\mu'^3 \Delta\rho g}} \quad (31)$$

для турбулентного движения

$$Q_{\text{кр}} = \sqrt[6]{\frac{20\sigma^5 d_0^5}{\rho'^3 (\Delta\rho^2) g^2}} \quad (32)$$

Межфазная поверхность при барботаже представляет собой суммарную поверхность всех пу-

зырьков по высоте столба жидкости h и определяется следующими соотношениями:

для свободного барботажа

$$F = \frac{6Qh}{U'' d_n}, \quad (33)$$

для цепного барботажа

$$F = \pi d_n h. \quad (34)$$

Приведенные выше формулы применимы к пузырям диаметром не более 1 мм. Крупные пузыри при всплывании (подъеме) деформируются, приобретая эллипсоидную или полусферическую форму (см. рис. 1), а их движение становится спиральным. Поэтому в данном случае расчет значительно усложняется, так как диаметр пузыря d_n в некоторой степени является величиной условной.

Существующая гидродинамическая аналогия барботажа и кипения в условиях вынужденного течения С.С. Кутателадзе показала, что критерий гидродинамической устойчивости равен

$$K = \frac{v''_{cm} \sqrt{\rho''}}{\sqrt[4]{g\sigma(\rho' - \rho'')}}. \quad (35)$$

Характерный переход к кризису теплоотдачи при кипении или к образованию газовой пленки в случае барботажа практически одинаков для обоих этих явлений [2].

Для определения скорости всплытия одного пузыря в неподвижной жидкости $\omega_{\text{пуз}}$ широко используется формула Франк-Каменецкого:

$$\omega_{\text{пуз}} = 1.5 \sqrt[4]{g\sigma(\rho' - \rho'') / (\rho')^2}. \quad (36)$$

Эта зависимость действительна в случае, когда диаметр канала существенно выше размера крупных пузырей.

Гидравлические характеристики барботажного слоя существенно зависят от физико-химических свойств среды. Большое влияние при барботаже оказывают растворенные в воде электролиты. Они содержатся обычно в водах паровых котлов, концентратных испарителей и парообразователей. В воде аппаратов из углеродистых сталей всегда присутствуют взвеси окислов железа. При взаимодействии электролитов со взвесьями окислов железа и другими мелкодисперсными частицами водяные пленки во время барботажа пара становятся более устойчивыми, их вспенивающая способность возрастает, а паросодержание барботажного слоя увеличивает-

ся. Однако и термическое содержание конструкций барботажа при переносе также увеличивается.

Выводы. 1. Закономерности, установленные для одиночного всплывающего пузыря, справедливы и при массовом барботаже пузырьков, если скорость газового потока невелика (0,1–0,3 м/с для свободного сечения аппарата). При более высоких скоростях пузыри сливаются в сплошную струю, которая разрушается на некотором расстоянии от отверстия с образованием пены. Размеры пузырей в пене различны.

2. В теплотехнике, как и в гидравлике, широкое распространение получил метод моделирования явлений теплообмена в различных условиях с помощью критериев подобия. Для этого достаточно соблюдать равенство соответствующих критериев подобия в данных условиях и в условиях опыта. Равенство критериев подачи указывает, что явления теплообмена и гидравлики протекают подобным образом.

3. Указанная методика может быть использована не только при расчете режимов химических аппаратов, но и в очистных сооружениях, в которых для интенсификации перемешивания и очистки жидкости от загрязнений путем барботажа её насыщают пузырями газов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гальперин Е.М., Лукс А.Л., Крестин Е.А. Об определении потерь напора в трубах при гидравлическом расчёте кольцевой водопроводной сети // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2012. №2(6). С. 54–58. DOI: 10.17673/Vestnik.2012.02.10.
2. Лукс А.Л., Крестин Е.А., Шувалов М.В. Анализ влияния волнисто-шероховатой поверхности на гидравлическое сопротивление и теплоотдачу при турбулентных течениях потока жидкостей в промышленных трубах // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2013. №1(9). С. 93–113. DOI: 10.17673/Vestnik.2013.01.15.
3. Китаев А.И., Лукс А.Л., Порядин А.В. Тепловые трубы повышенной тепловой проводимости как базовые элементы системы терморегулирования в аэрокосмической технике // Специальный выпуск, подготовленный по материалам международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 24–26 июня 2008 г.). Самара, 2009. 98 с.
4. Крестин Е.А. Задачник по гидравлике с примерами расчетов / СГАСУ. Самара, 2006. 316 с.
5. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
6. Крестин Е.А. Гидравлика: учебное пособие. Изд. 2-е, переработ. и доп. / СГАСУ. Самара, 2006. 254 с.

7. Крестин Е.А. Примеры решения задач по гидравлике: учебное пособие / СГАСУ. Самара, 2007. 116 с.

8. Лукс А.Л., Матвеев А.Г. Исследование высокоэффективных аммиачных тепловых труб энергосберегающих систем терморегулирования крупногабаритных конструкций космического аппарата // Вестник СамГУ. 2007. № 6 (56). С. 401–418.

9. Будыкина Т.А., Емельянов С.Г. Процессы и аппараты защиты гидросферы. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 288 с.

10. Садовникова Л.К., Орлов Д.С., Розановская И.Н. Экология и охрана окружающей среды при химическом загрязнении. М.: Высш. шк., 2006. 334 с.

11. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: ООО ТИД Альянс, 2004. 753 с.

12. Шабанова А.В. Методы контроля окружающей среды в примерах и задачах: учебное пособие / СГАСУ. Самара, 2007.

13. Герасимов Ю.Л., Шабанова А.В. Рекультивация водоёмов в социально-экономическом развитии территории // Инновационные подходы к обеспечению устойчивого развития социо-эколого-экономических систем: материалы Международной конференции (19-21 мая 2014 г.). Самара-Тольятти, 2014. С. 69–73.

14. Шабанов В.А., Шабанова А.В. Исследование динамики загрязненности воды Ветлянского водохранилища (2000-2012 гг.) // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки. 2012. № 3. С.1737–1740.

15. Шабанова А.В. Тяжелые металлы в снеговом покрове внутриквартальных рекреационных объектов Самары // Экология и промышленность России. 2014. № 12. С. 40–43.

Об авторах:

ЛУКС Александр Леонидович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник по механике жидкостей, газа и плазмы, научный руководитель НИЛ «Теплоэнерготехника» Самарский государственный университет 443011, Россия, г. Самара, ул. Академика Павлова, 1

КРЕСТИН Евгений Александрович

кандидат технических наук, профессор кафедры общей и прикладной физики и химии Самарский государственный архитектурно-строительный университет 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194

МАТВЕЕВ Андрей Григорьевич

заведующий НИЛ «Теплоэнерготехника» Самарский государственный университет 443011, Россия, г. Самара, ул. Академика Павлова, 1

ШАБАНОВА Анна Всеволодовна

кандидат химических наук, доцент кафедры природоохранного и гидротехнического строительства Самарский государственный архитектурно-строительный университет 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194

КИТАЕВ Александр Ирикович

заместитель начальника отделения АО «РКЦ (ракетно-космический центр) «Прогресс» 443009, Россия, г. Самара, ул. Земеца, 18

LOUKS Aleksandr

PhD in Engineering Science, Senior Research Assistant in the sphere of Mechanics of Liquid, Gas and Plasma, "Honored Worker of Higher School of RF", Scientific Coordinator of Research Laboratory "Теплоэнерготехника" Samara State University 443011, Russia, Samara, Academician Pavlova st, 1

KRESTIN Evgeny

PhD in Engineering Science, Professor of General and Applied Physics and Chemistry Department Samara State University of Architecture and Civil Engineering 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya St., 194

MATVEEV Andrey

Head of the Research Laboratory "Теплоэнерготехника", the Office of Scientific Analysis Samara State University 443011, Russia, Samara, Academician Pavlova St., 1

SHABANOVA Anna

PhD in Engineering Science, Associate Professor of Environmental and Hydraulic Engineering Department Samara State University of Architecture and Civil Engineering 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya St., 194

KITAEV Aleksandr

Deputy Head of Department at JSC "Progress" 443009, Russia, Samara, Semeca St., 18

Для цитирования: Лукс А.Л., Крестин Е.А., Матвеев А.Г., Шабанова А.В., Китаев А.И. Исследование скорости всплытия пузыря газа (пара) в процессе барботажа при различных режимах // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2016. №1(22). С. 34-40. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.01.6.

For citation: Louks A.L., Krestin E.A., Matveev A.G., Shabanov A.V., Kitaev A.I. Rate of gas (vapor) bubble floating up during the process of bubble aeration at different modes // Vestnik SGASU. Town Planning and Architecture. 2016. № 1(22). Pp. 34-40. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.01.6.