

УДК 532.542.1; 54-172

## НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ КИНЕТИКИ РАЗГАЗИРОВАНИЯ ГАЗОНАСЫЩЕННОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ СКОРОСТНОМ ТЕЧЕНИИ В КАНАЛАХ

Ф. Р. ЛАТЫПОВ<sup>1</sup>, Р. А. КАРИМОВ<sup>2</sup>, А. М. БИКБУЛАТОВ<sup>3</sup>, Г. К. АГЕЕВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>vei10@yandex.ru, <sup>2</sup>karimov.ra@bk.ru, <sup>4</sup>ageevgeo@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 22.05.2019

**Аннотация.** Приводятся опытные данные по разгазированию двух жидкостей, насыщенных углекислым газом, вращающихся в цилиндрическом сатураторе с мешалкой. Осуществлялось измерение количества выделившегося газа при различных скоростях вращения и темпах сброса давления. Обобщение опытных данных по кинетике разгазирования вращающихся потоков газонасыщенной жидкости осуществляется в критериальном виде с учетом темпа сброса давления. На основе газодинамической аналогии, полученное соотношение трансформируется в формулу для расчета депрессюризации насыщенной газом жидкости при движении в прямолинейном канале.

**Ключевые слова:** газовая кавитация, кинетика разгазирования, газонасыщенная жидкость, темп разгазирования, рост пузырей, сатуратор, депрессюризация насыщенным газом жидкости, гидродинамическая неустойчивость, газогенерация, кинетика роста пузырей, кинетика пузырькового газовыделения.

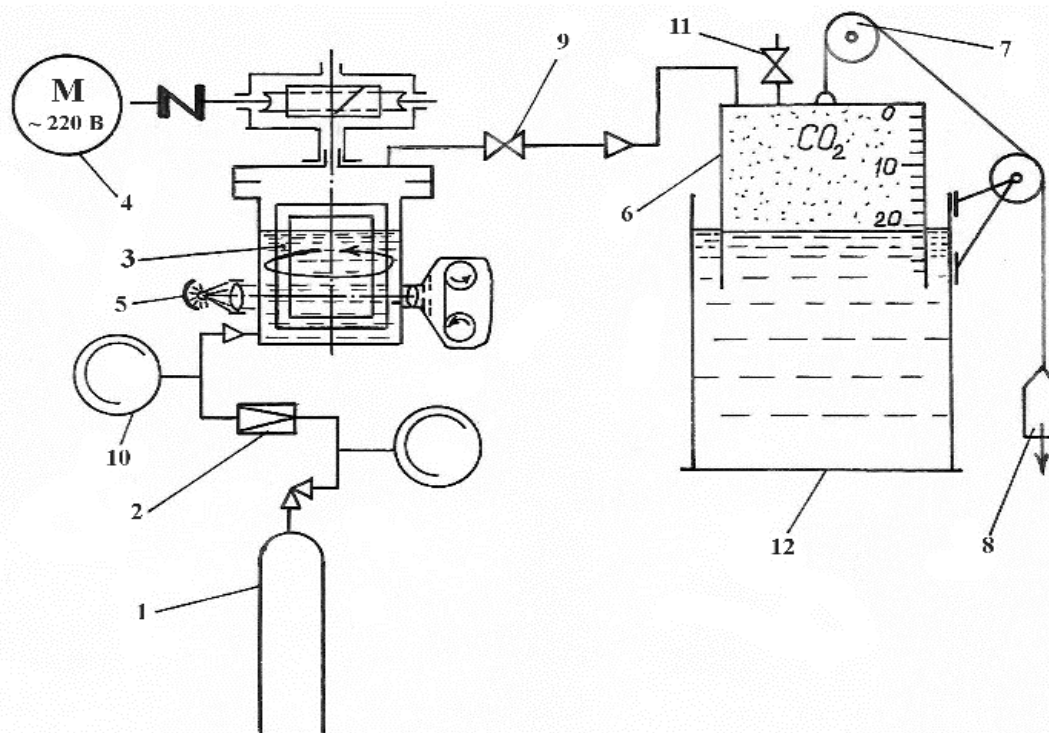
Темп выделения газов из газонасыщенной жидкости представляет интерес при проектировании нефтепроводов [1, 2], в которых при добыче, транспортировке и хранении выделяется попутный газ, при анализе изменений в крови живых существ в результате аварийной декомпрессии на космической станции [3, 6], в системах, используемых в авиации и работающих на больших высотах, при газовой кавитации в гидравлических системах горных машин, а также в системах, работающих при высоких температурах.

По выбранному направлению исследования имеют определенный дисбаланс в направленности теоретических и экспериментальных исследований. С одной стороны, химическая теория растворов, включающая понятия термодинамического потенциала, активности паров и закона Генри, применима к инженерным расчетам и неплохо разработана [1, 8–10]. С другой стороны, распро-

странить эти данные на все условия разгазирования газонасыщенной жидкости в широком классе каналов не представляется возможным, так как механизм разгазирования во многих случаях не ясен.

Не удастся этот механизм выяснить в «чистом виде» и в опытах по определению газосодержания разгазируемого потока при движении в протяженных прямолинейных каналах, так как темп разгазирования оказывается, согласно уравнению Бернулли, жестко привязан к скорости движения газонасыщенной среды, что не позволяет определить влияние отдельных факторов на кинетику процесса.

Указанную взаимосвязь можно разомкнуть, если провести опыты с регулируемым темпом сброса давления в замкнутом сосуде, при вращающейся с разной скоростью газонасыщенной жидкостью. Потом полученные данные можно попытаться распространить и на случай движения газонасыщенной жидкости в прямолинейных и изогнутых каналах.



**Рис. 1.** Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – баллон с углекислым газом; 2 – редуктор с автоматическим поддержанием темпа сброса давления; 3 – мешалка; 4 – электродвигатель; 5 – осветительное устройство; 6 – газовый колпак; 7 – блок для подвески газового колпака; 8 – груз для компенсации веса газового колпака; 9 – дроссель (работающий на пару с редуктором 2); 10 – манометр, показывающий давление внутри сатуратора; 11 – дренажный вентиль; 12 – бак с льняным маслом (слабо растворяющим углекислый газ)

Исходя из этого, были проведены опыты по разгазированию двух жидкостей (воды и трансформаторного масла) в цилиндрическом сатураторе с мешалкой и прозрачными окнами для наблюдения (через микроскоп) процесса образования, роста и отрыва газовых пузырей в поток при интегральной оценке всей массы выделившегося из жидкости газа ( $\text{CO}_2$ ).

На рис. 1 показана экспериментальная установка.

Сатуратор имел внутренние размеры  $\varnothing 150 \times 327$  мм, два ряда вертикальных, друг против друга окон, для скоростной киносъемки. На одном из нижних окон была организована горизонтальная площадка (материалом и шероховатостью стенок которой можно было варьировать) для изучения динамики роста отдельных пузырей в разных условиях зарождения.

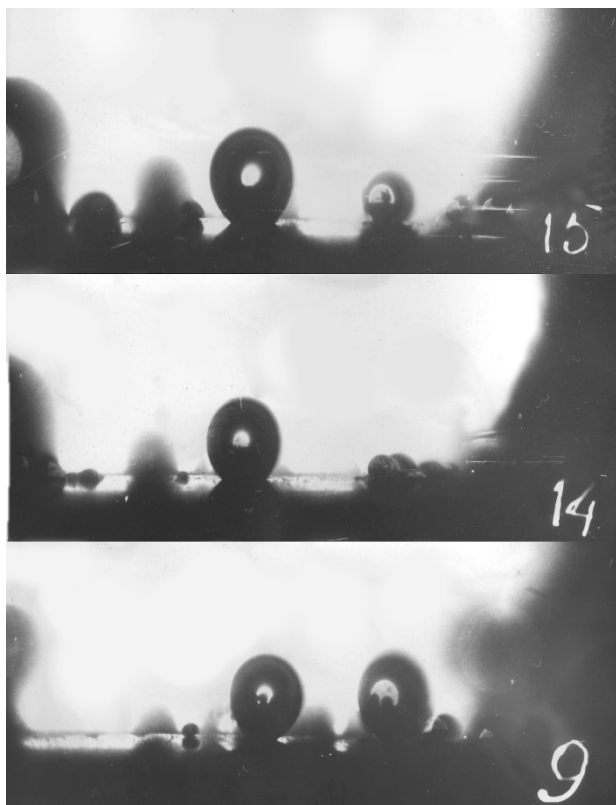
Сбор выделившегося углекислого газа осуществлялся газовым колпаком. При объеме сатуратора  $5,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ , он заливался жидкостью не полностью (только в объеме  $4,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ), чтобы предотвратить попадание

пены в газоотводящий патрубок на максимальных режимах вращения конуса жидкости, возникающего под действием центробежных сил.

В основной части опытов, при начальных давлениях жидкости  $P_0 = 0,5; 0,4; 0,3; 0,2$  МПа, температурах  $T_0 = 291; 298$  К и скорости вращения мешалки  $n = 9$  об/с, темп сброса давления варьировал в диапазоне  $dp/d\tau = 0,03 \div 0,15$  МПа/с.

Опыты проводились так. Сначала жидкость насыщалась углекислым газом при определенном давлении, затем запускалось вращение и после его стабилизации осуществлялся сброс давления через дифференциально-управляемый редуктор DRAC. На названном редукторе имелась возможность поддерживать линейный по времени темп сброса давления в системе.

Давление в сатураторе и мгновенный объем выделившегося газа регистрировался самопишущими приборами. Осуществлялась микро-фотокиносъемка роста пузырей внутри сатуратора на контрольных пластинах из разных материалов и с разной шероховатостью поверхности.



**Рис. 2.** Выборочные кадры скоростной микрокиносъемки роста пузырей углекислого газа на контрольной поверхности при ее обтекании скоростным потоком газонасыщенной воды ( $dp/dt = 0,125$  МПа/с,  $n = 1,0$  об/с)

На рис. 2 приведены выборочные кадры скоростной микрокиносъемки роста пузырей углекислого газа на контрольной металлической поверхности при ее обтекании скоростным потоком газонасыщенной воды.

Между кадрами 9 и 14 промежуток времени составляет 0,52 с, а между кадрами 14 и 15 – 0,08 с. На всех этих трех кадрах движение газонасыщенной жидкости происходило слева направо (на кадре 9 даже видно, что набегающий поток жидкости заставил центральный пузырек наклониться вправо).

В кадре 9 в фокусе кинокамеры наблюдаются два газовых пузыря: в центре со средним диаметром 1,87 мм и справа со средним диаметром 1,92 мм. Причем изображение правого пузыря несколько размыто в кормовой части из-за турбулентных пульсаций, видимо, достающих ему от находящегося вверх по течению центрального пузыря.

В кадре 14 видно, что левого пузыря уже нет (он до этого оторвался, достигнув диаметра 2,95 мм). Центральный же пузырек все еще держится за стенку на своем месте, продолжая медленно и устойчиво расти (в этом кадре его диаметр уже достиг 2,65 мм).

В кадре 15 центральный пузырек почти достиг максимального диаметра 3,10 мм (дальнейший просмотр киносъемки показывает, что через 0,04 с он полностью отрывается от стенки). Одновременно справа от него, судя по кинозаписи, на старом месте газогенерации появился новый пузырек, на данный момент уже набравший диаметральный размер 1,85 мм. На рис. 3 представлены опытные данные по кинетике роста пузырей на контрольной перед окошком для наблюдений вблизи боковой поверхности сатуратора.

Здесь четыре верхние кривые относятся к выделению углекислого газа из газонасыщенной воды при темпе сброса давления 0,125 МПа/с (но с разными угловыми скоростями вращения мешалки). Нижние четыре кривые соответствуют случаю разгазирования жидкостей при темпах сброса давления 0,05 и 0,1 МПа/с, при трех скоростях вращения мешалки ( $n = 1,0; 1,15; 1,5$  об/с). При этом из четырех нижних кривых три относятся к опытам с трансформаторным маслом, а четвертая кривая (пунктирная, темп сброса давления 0,05 МПа) относится к опыту с водой. На рис. 3 крестиком помечены точки, соответствующие моментам отрыва пузырей от стенки. Из графика также видно, что максимальный размер пузырей, достигаемый при отрыве от стенки, для опытов с водой и трансформаторным маслом один и тот же (3,05 мм). В то же время частота отрыва пузырей от стенки для воды оказывается значительно выше, чем в случае с трансформаторным маслом. Соответствующее различие в частотах отрыва, согласно нашим наблюдениям, оказалось пропорциональным известной капиллярной величине, впервые введенной в работах С. С. Кутателадзе [5, 6]:

$$\sqrt{\sigma/(\rho' - \rho'')g} . \quad (1)$$

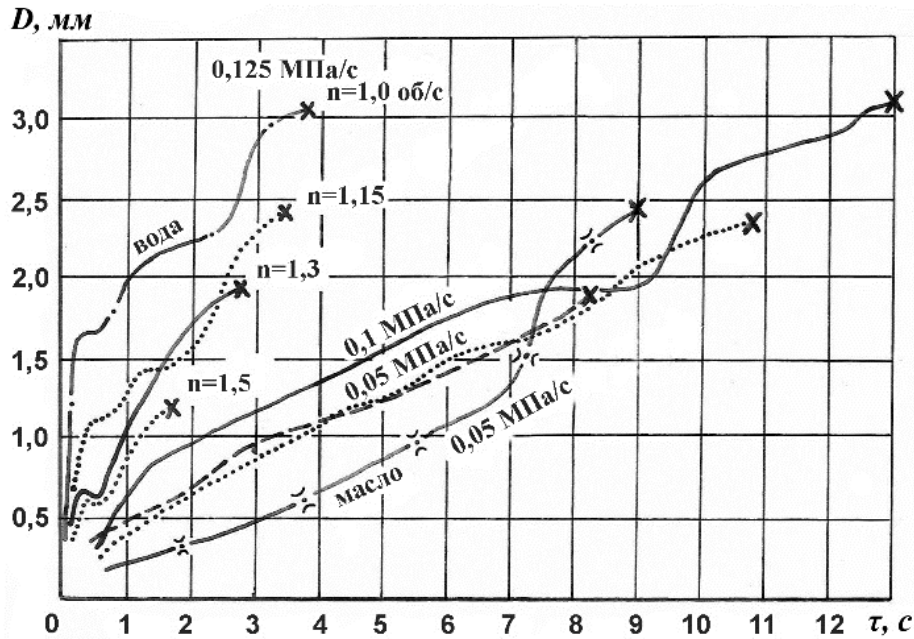


Рис. 3. Опытные данные по кинетике роста пузырей на контрольной горизонтальной металлической пластине, установленной перед окошком для наблюдений

На рис. 4 и 5 показаны экспериментальные данные по разгазированию воды и трансформаторного масла в сатураторе при температуре  $T=291$  К и разных скоростях вращения мешалки ( $n = 0 - 4$  об/с), при темпе сброса давления  $0,05$  МПа/с.

Обработка опытных данных по разгазированию вращающегося потока газонасыщенной жидкости была приведена в критериальном виде:

$$\bar{\alpha} = \frac{V''}{V_0} = 2,83 \cdot 10^{-4} \left( \frac{dp}{d\tau} \right) \times \left( \frac{v'}{v''} \right) \left( 1 + \frac{Re}{1,75 \cdot 10^5} \right)^{2,5} \cdot \tau, \quad (2)$$

где  $\bar{\alpha}$  – относительное объемное газовыделение [2, 10];  $\frac{dp}{d\tau}$  – темп сброса давления;  $v'$ ,  $v''$  – коэффициенты кинематической вязкости жидкости и растворенного газа соответственно;  $Re$  – число Рейнольдса (вращательное), оно рассчитывалось по формуле:

$$Re = \frac{nD^2}{v'} \cdot \frac{A}{A_0}, \quad (3)$$

где  $D$  – внутренний диаметр цилиндрического сосуда;  $A/A_0$  – отношение эффектив-

ных площадей ометания идеальной и реальной мешалками [8].

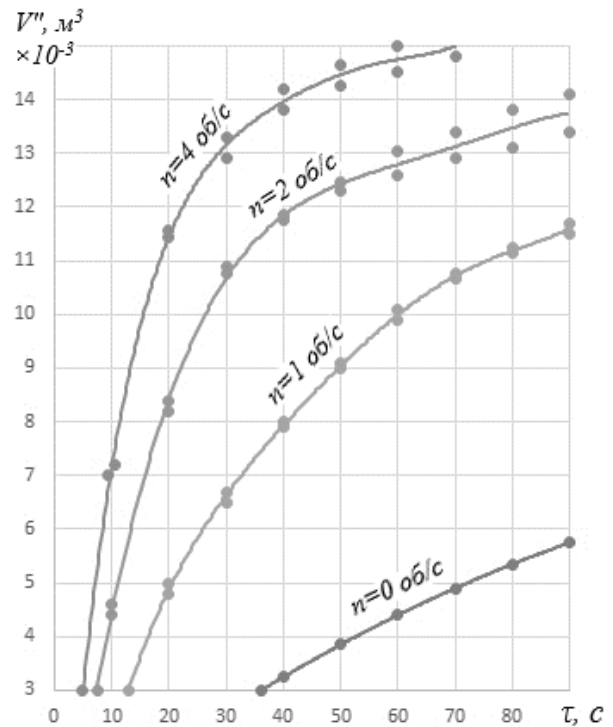


Рис. 4. Результаты опытов по разгазированию вращающегося потока воды при разных скоростях вращения мешалки  $n$

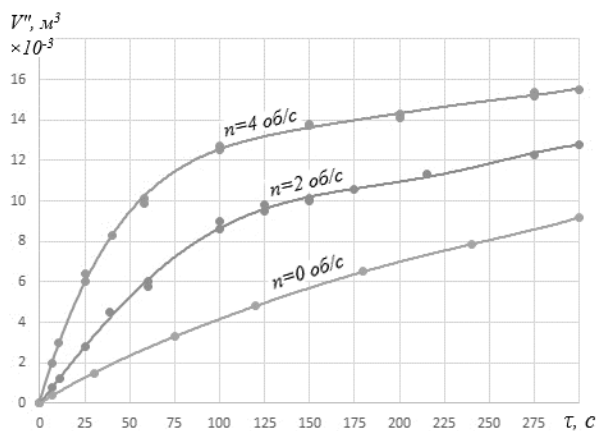
В наших опытах темп сброса давления на пределе достигал  $2,0 \cdot 10^5$  [Па/с], а число  $Re$  варьировалось в диапазоне от 0 до  $150 \cdot 10^3$ ,

$\tau = 0 - 50$  с. В доверительном диапазоне 98 %, формула (2) обладает погрешностью  $\pm 8$  %.

Из рис. 3 по кинетике роста пузырей на поверхности горизонтальной пластины видно, что для воды – чем больше скорость вращения мешалки – тем быстрее пузырек отрывается от стенки (при  $n = 1,0$  об/с,  $D_{\max} = 3,0$  мм, а при  $n = 1,5$  об/с,  $D_{\max} = 1,2$  мм).

Для трансформаторного масла процесс роста пузырей происходит не так однозначно. При темпе сброса давления 0,05 МПа/с, но при разных скоростях вращения мешалки ( $n = 0,03$  об/с и  $n = 1,5$  об/с) пузыри вырастают до одинакового размера, примерно 2,3–2,4 мм, правда, за разное время (9,0 и 10,8 с).

Дольше всех росли и не отрывались от стенки (до времени 13,0 с) пузыри в трансформаторном масле при темпе сброса давления 0,1 МПа/с и скорости вращения мешалки 1,3 об/с.



**Рис. 5.** Результаты опытов по разгазированию вращающегося потока трансформаторного масла при разных скоростях вращения мешалки  $n$

На рис. 3 до размера 0,2–0,4 мм не показаны начальные моменты роста пузырей, так как «на старте» имелись волновые (пульсационные) закономерности их роста. На фотокамере в таком режиме было трудно получить четкое изображение границы между пузырьком и жидкостью. Однако, скоростная киносъемка показала значительное отклонение формы пузыря от сфероидальной и пульсацию (то набухание, то сжатие) границы раздела сред с частотой  $\nu$  от 50 до 120 Гц, что подтверждает теорию гидроди-

намической неустойчивости Гельмгольца для начальной стадии роста зародышей газовой или паровой фазы в жидкости [5–7].

Важным заключением из проведенных опытов стало то, что, как показывает микрокиносъемка, скорость роста пузырей на стенке не задает однозначно темп разгазирования всего объема вращающейся жидкости. Здесь главную роль играет общий потенциал метастабильности разгазируемой жидкости.

Как показали исследования известного ученого-химика УГАТУ Р. К. Амирханова, потенциал метастабильности разгазируемой жидкости зависит от химического сродства газа и жидкости, содержащей в себе этот газ, и химического потенциала равновесия  $\mu_p$  в реакции между растворенным газом и конденсированной фазой [1]:

$$\mu_p = \mu_p^o + \tilde{R}T \ln \frac{f_i}{f_{io}} \quad (4)$$

Здесь  $\mu_p$  – химический потенциал равновесия при стандартных условиях,  $\tilde{R}$  – газовая постоянная условной газовой смеси, вычисляемая по парциальным массовым долям жидкости и газа,  $T$  – температура газонасыщенной жидкости,  $\frac{f_i}{f_{io}}$  – летучести (текущая и стандартная) растворенного газа над жидкостью (их соотношение  $\frac{f_i}{f_{io}}$  обычно в справочной литературе дается в виде активности паров  $\bar{a}_i$  [6, 9]).

Теоретический анализ показывает, что при разгазировании газонасыщенной жидкости, соотношение активности паров  $\bar{a}_i$  может быть заменено на соотношение парциальных давлений компонент разделяющейся двухфазной смеси. А это, в свою очередь, позволяет выйти на величину относительного объемного газовыделения  $\bar{\alpha}$ , использованную нами в формуле (2).

Если соотнести данные по вращательному разгазированию жидкости со случаем ее прямолинейного движения в канале с падающим давлением, то, принимая во внимание ряд допущений, мы можем предложить следующую формулу для расчета депрессоризации насыщенным газом жидкости при движении в прямолинейном канале:

$$\bar{\alpha} = 0,62 \cdot 10^{-4} \left( \frac{dp}{d\tau} \right) \times \left( \frac{v'}{v''} \right) \left( 1 + \frac{Re}{4,93 \cdot 10^4} \right)^{1,8} \cdot \tau. \quad (5)$$

Здесь  $Re$  – число Рейнольдса уже должно рассчитываться для движения газонасыщенной жидкости в прямолинейном канале.

## ВЫВОД

Анализ кадров по кинетике пузырькового газовыделения на контрольной пластинке экспериментального сосуда с мешалкой позволяет нам на этом этапе исследования сделать вывод о том, что имеется определенная неопределенность газовыделения на поверхности стенки сосуда с вращающейся газонасыщенной жидкостью. Существуют как «домены» ускоренного роста пузырей с поршневым эффектом выдавливания, так и «домены» медленного монотонного роста пузырей.

Сопоставление формулы (5) с опытными данными по разгазированию прямолинейно движущихся в цилиндрических каналах жидкостей [4], показали удовлетворительное совпадение выведенной нами формулы с опытными данными рассмотренных авторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Амирханов А. К.** Растворимость газов в жидкостях. Уфа: Изд. ИХ БФАН СССР, 1988. 88 с. [ A. K. Amirkhanov, *Solubility of gases in liquids*, (in Russian). Ufa: Izd. IH BFAN SSSR, 1988. ]
2. **Бараненко В. И., Киров В. С., Мусленко А. Н.** Расчет парциальных объемов растворенных в жидкостях газов // Журнал физической химии. 1990. № 5. С. 1208. [ V. I. Baranenko, Kirov V. S., Maslenko A. N., "Calculation of partial volumes of gases dissolved in liquids", (in Russian), in *Zhurnal fizicheskoy himii*, no. 5, p. 1208, 1990. ]
3. **Гидродинамика** кровообращения (сб. переводов). М.: Мир, 2001. 191 с. [ *Gidrodinamika krovoobrashcheniya (sb. perevodov)*, (in Russian). Moscow: Mir, 2001. ]
4. **Куров А. А.** Исследование истечения и дробления газонасыщенной жидкости. Автореф. канд. дисс. Л.: ЛПИ, 1973. 18 с. [ A. A. Kurov, *Investigation of the flow and crushing of gas-saturated liquid*: PhD: L.: LPI, 1973. 18 p. ]
5. **Кутателадзе С. С., Стырикович М. А.** Гидродинамика газожидкостных систем. М.: Энергия, 1976. С. 36. [ S. S. Kutateladze, M. A. Styrikovich, *Hydrodynamics of gas-liquid systems*, (in Russian). Moscow: Energia, 1976. ]
6. **Кутепов А. М., Стерман Л. С., Стюшин Н. Т.** Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. М.: Высшая школа, 1977. 352 с. [ A. M. Kutepov, L. S. Sterman,

N. T. Styushin, *Hydrodynamics and heat transfer during vaporization*, (in Russian). Moscow: Vysshaya shkola, 1977. ]

7. **Латыпов Ф. Р.** Массовая скорость вскипающего криогенного потока при критическом течении в гофрированных трубах // Сибирский физико-технический журнал. 1991. Вып. 2. С. 104–105. [ F. R. Latypov, "Mass velocity of boiling cryogenic flow during critical flow in corrugated tubes", (in Russian), in *Sibirskij fiziko-tekhnicheskij zhurnal*, no. 2, pp. 104-105, 1991. ]

8. **Маленков И. Г., Везиришвили Д. А., Чиннов Е. А.** Экспериментальное исследование механизма роста газовых (паровых) пузырей на единичном отверстии при разных давлениях // Сб. науч. трудов: Кипение и конденсация (Гидродинамика и теплообмен). Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1986. С. 13–23. [ I. G. Malenkov, D. A. Vezirishvili, E. A. Chinnov, "Experimental study of the growth mechanism, gas (steam) bubbles at a single orifice at different pressures", (in Russian), in *Sb. Nauch. Trudov: Kipenie I kondensachia (Gidrodinamika I teploobmen)*, Novosibirsk: In-t teplofiziki SO AN SSSR, pp. 13-23, 1986. ]

9. **Пригожин И. Р.** Молекулярная теория растворов. М.: Металлургия, 1990. 360 с. [ I. R. Prigogine, *Molecular theory of solutions*, (in Russian). Moscow: Metallurgiya, 1990. ]

10. **Романков П. Г., Курочкин М. И.** Гидромеханические процессы химической технологии. Л.: Химия (ЛО), 1982. 287 с. [ P. G. Romankov, M. I. Kurochkin, *Hydromechanical processes of chemical technology*, (in Russian). L.: Himia (LO), 1982. ]

## ОБ АВТОРАХ

**ЛАТЫПОВ Фарит Рафгатович**, доц. каф. авиационной теплотехники и теплоэнергетики. Дипл. инженера-механика по АД (УАИ, 1972). Канд. техн. наук по теплотехнике (ЛПИ, 1976). Иссл. в обл. течения криогенных и газонасыщенных жидкостей.

**КАРИМОВ Руслан Альтафович**, ст. преп. каф. авиационной теплотехники и теплоэнергетики. Дипл. инженер (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. пленочного охлаждения твердых поверхностей.

**БИКБУЛАТОВ Ахат Мидхатович**, доц. каф. авиационной теплотехники и теплоэнергетики. Дипл. инженера-механика по АД (УАИ, 1976). Канд. техн. наук. (УАИ, 1983). Иссл. в обл. энергетических установок на базе конвертированных авиационных двигателей.

**АГЕЕВ Георгий Константинович**, доц. каф. авиационных двигателей. Дипл. инж. по авиационным двигателям (УГАТУ, 2007), канд. техн. наук (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. моделирования параметров агрегатов ГТД и энергоустановок летательных аппаратов по наработке.

## METADATA

**Title:** Some regularities of kinetics of digging gas-saturated liquid at high speed flow in channels.

**Authors:** F. R. Latypov<sup>1</sup>, R. A. Karimov<sup>2</sup>, A. M. Bikbulatov<sup>3</sup>, G. K. Ageev<sup>4</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>vei10@yandex.ru, <sup>2</sup>karimov.ra@bk.ru, <sup>4</sup>ageevgeo@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 23, no. 3 (85), pp. 72-78, 2019. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** Experimental data are given on the degassing of two liquids saturated with carbon-acid gas, rotating in a cylindrical saturator with a stirrer. The amount of evolved gas was measured at different rotation speeds and pressure release rates. The generalization of experimental data on the kinetics of the degassing of rotating flows of gas-saturated liquid is carried out in the criteria form, taking into account the rate of pressure relief. Based on the gas-dynamic analogy, the resulting ratio is transformed into a formula for calculating the depuration of a gas-saturated liquid when moving in a straight channel.

**Key words:** gas degassing kinetics, gas degassing rate, bubble growth.

**About authors:**

**LATYPOV Farit Ravgatovich, assist. prof.** of aviation heat and power engineering department. Dipl. Ing. of aviation engines (UAI, 1972). Candidate of Tech. Sci. (LPI, 1976). Scientific interests: studies in the flow of cryogenic and gas-saturated liquids.

**KARIMOV, Ruslan Altafovich, st. teacher** of aviation heat and power engineering department. Dipl. Ing. of thermal power (USATU, 2005). Scientific interests: modeling and calculation of turbines.

**BIKBULATOV Ahat Midhatovich, assist. prof.** of aviation heat and power engineering department. Dipl. Ing. of aviation engines (UAI, 1976). Candidate of Tech. Sci. (UAI, 1983). Research in the field of power plants based on converted aircraft engines.

**AGEEV George Konstantinovich, assist. prof.** of aircraft engines. Dipl. Ing. of aviation engines (USATU, 2007). Candidate of Tech. Sci. (USATU, 2012). Research in the field of modeling the parameters of gas turbine engines and power plants of aircraft.