

УДК 544.015.22

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЫДЕЛЕНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО CO₂ В ПЕРЕГРЕТОМ ПРИСТЕННОМ СЛОЕ РАСТВОРА C₃H₆O-CO₂

Дехтярь Руслан Анатольевич¹,
dekhtyar@itp.nsc.ru

Овчинников Валерий Викторович¹,
avks@itp.nsc.ru

¹ Институт теплофизики СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 1.

Актуальность работы обусловлена тем, что для увеличения коэффициента нефтеотдачи используется технология с применением в качестве вытесняющего вещества углекислого газа. Выделение и поглощение углекислого газа является одним из основных факторов, влияющих на скорость изменения климата на Земле.

Цель работы: изучение особенностей процесса выделения углекислого газа в сильно перегретом (метастабильном) слое раствора C₃H₆O-CO₂.

Объект: раствор диоксида углерода CO₂ в диметилкетоне C₃H₆O.

Методы исследования: метод визуализации газовой выделенности в жидкости. Для создания слоя метастабильной жидкости проводился импульсный разогрев тонкой проволоочки. По результатам цифровой обработки фото-видео материалов определялись размеры и форма образующихся пузырьков углекислого газа и скорость движения границы зоны газовой выделенности вдоль проволоочки. На кадрах трудно отличить пузырьки газообразного CO₂ от паровых пузырьков C₃H₆O, поэтому для разделения данных по кипению и газовой выделенности определялась массовая доля паров C₃H₆O в парогазовой полости по изменению объема пузырька и с использованием уравнения состояния CO₂ и C₃H₆O.

Результаты. В зависимости от степени метастабильности пристенного слоя раствора C₃H₆O-CO₂ при давлении в рабочем объеме от 40 до 260 кПа получены экспериментальные данные, которые позволили выделить несколько режимов газовой выделенности. Показано, что при невысокой степени метастабильности пристенного слоя жидкости выделение газообразного CO₂ происходит в режиме последовательной цепной активации центров газовой выделенности, а при высокой степени метастабильности и давлении в объеме больше 140 кПа выделение газообразного CO₂ происходит в режиме «плёночного газовой выделенности». Для всех режимов газовой выделенности скорость движения границы газовой выделенности практически постоянна во времени, но для различных режимов газовой выделенности значения скорости отличаются на порядок.

Ключевые слова:

Гетерогенное газовой выделенности, кипение, метастабильность, раствор, фазовый переход.

Введение

Актуальность усовершенствования технологий и методов увеличения нефтеотдачи в настоящее время не вызывает сомнения. Это связано с уменьшением запасов легко извлекаемой нефти [1], разработкой морских месторождений [2] и необходимостью использования новых технологий на разрабатываемых месторождениях с целью сохранения максимально возможного уровня нефтедобычи [3]. Важным элементом современных технологий является интеллектуальная система управления производственными процессами на объектах нефтегазового месторождения. Для обеспечения оптимальных условий и режимов работы оборудования на месторождении требуется, чтобы математические модели адекватно описывали статику и динамику изменения во времени как можно большего числа режимных параметров [4]. Для проверки адекватности математической модели требуются экспериментальные данные, в том числе, полученные для условий, соответствующих аварийным режимам работы оборудования.

Одним из вариантов повышения уровня нефтеотдачи является метод, когда в качестве вытесняющего агента используется углекислый газ (CO₂) [5, 6]. При использовании углекислого газа в лабораторных условиях, при неограниченной смесимости, коэффициент

вытеснения нефти может достигать 100 % [7]. Однако коэффициент растворимости углекислого газа в нефти сильно зависит от давления и температуры [5]. Вследствие этого очень важно правильно рассчитывать скорость и интенсивность выделения газообразного CO₂ при движении газонасыщенной нефти по скважине и в установках подготовки нефти к транспортировке по нефтепроводу [8, 4]. При выделении газообразного CO₂ в водонефтяных эмульсиях также возможно образование газогидратов [9], которое необходимо учитывать в алгоритмах быстрого анализа проблемных зон гидратообразования [10].

Ещё очень важно отметить, что процессы поглощения и эмиссии углекислого газа во многом определяют скорость изменения климата на Земле. Очистка газовых выбросов на предприятиях нефтегазовой промышленности заметно снижает поступление диоксида углерода в атмосферу [11]. Величину эмиссии углекислого газа можно оценить по данным о составе газов в пузырьках, заключённых в различных слоях ледников и мерзлых отложений [12]. Однако из-за недостатка теоретических и экспериментальных данных при расчёте глобального баланса CO₂ неопределённость может достигать 40 % [13]. В частности, многие модели, используемые для расчёта баланса CO₂, не учитывают особенностей термодинамической

устойчивости системы жидкость – углекислый газ в метастабильном состоянии.

При моделировании роста газового пузырька в газонасыщенной жидкости обычно принимаются следующие допущения: на поверхности пузырька образуется диффузионный слой, в котором происходит основное изменение концентрации растворенного газа, зависимость концентрации газа от давления удовлетворяет закону Генри и выделение растворенного газа происходит в равновесном режиме [14, 15]. Такие же допущения принимаются и при моделировании роста паровых пузырьков, когда вместо закона Генри используют уравнение Клапейрона–Клаузиуса. Соответственно имеет место существенная аналогия между кипением и газовой выделением [16]. В работе [17] было показано, что в зависимости от степени метастабильности переходный процесс от конвекции к кипению может протекать в двух режимах – медленной и быстрой волны, отличающихся масштабом скорости и структурой фронта вскипания. В общем случае структура зоны вскипания определяется суперпозицией одновременно протекающих быстрых и медленных автоволновых процессов в зависимости от величины перегрева поверхности нагревателя относительно температуры насыщения. Таким образом, увеличение размера области вскипания на твёрдой поверхности происходит не случайным образом, а в режиме цепной активации центров вскипания. Для жидких металлов достигаются высокие уровни метастабильности. В этом случае фазовый переход происходит взрывообразно, на нагревателе образуется паровая плёнка, минуя режим пузырькового кипения [18].

Целью настоящей работы является исследование физических процессов при выделении углекислого газа в метастабильном слое жидкости около протяженного цилиндрического нагревателя.

Экспериментальная установка, методы измерений

Для опытов был выбран раствор C₃H₆O-CO₂ (диметилкетон-диоксид углерода), так как в этой системе можно было достигнуть высоких уровней метастабильности для растворенного диоксида углерода. На рис. 1 показано, как зависит значение равновесной концентрации углекислого газа C_{CO₂}(P,T) в растворе C₃H₆O-CO₂ от температуры жидкости T для различных давлений P. Видно, что равновесная концентрация уменьшается на порядок при нагреве жидкости на 80 градусов. Для вычисления значений равновесной концентрации углекислого газа C_{CO₂}(P,T) в растворе C₃H₆O-CO₂ использовалась эмпирическая зависимость:

$$C_{CO_2}(P, T) = C_E(P) \cdot \exp\left\{-\left[\frac{T - 170}{\eta(P)}\right]^{0,8}\right\}, \quad (1)$$

где значения коэффициентов C_E(P) и η(P) для давлений P от 40 кПа до 1,0 МПа и температур T от 283 до 450 К подбирались из соответствующих литературных источников [19–22] с точностью 7%:

$$C_E(P) = 5,6 \cdot 10^{-11} P^2 + 2,01 \cdot 10^{-5} P - 0,579,$$

$$\eta(P) = 11,77 - 1,97 \cdot 10^{-11} \cdot P^2 + 4,59 \cdot 10^{-5} P.$$

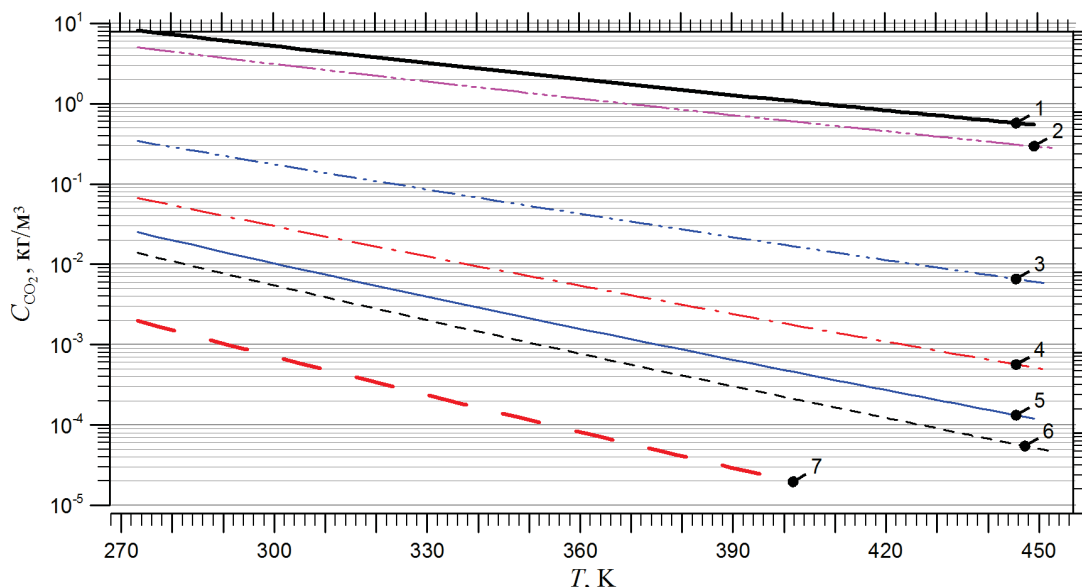


Рис. 1. Значения равновесной концентрации диоксида углерода C_{CO₂}(P,T) в растворе C₃H₆O-CO₂ в зависимости от температуры T. Расчёт по зависимости (1) для различных давлений P: 1 – 1,0 МПа, 2 – 0,8 МПа, 3 – 280 кПа, 4 – 150 кПа, 5 – 100 кПа, 6 – 80 кПа, 7 – 40 кПа

Fig. 1. Values of the equilibrium concentration of carbon dioxide C_{CO₂}(P,T) in C₃H₆O-CO₂ solution depending on the temperature T. Calculation according to equation (1) for various pressures P: 1 – 1,0 MPa, 2 – 0,8 MPa, 3 – 280 kPa, 4 – 150 kPa, 5 – 100 kPa, 6 – 80 kPa, 7 – 40 kPa

Для проведения экспериментальных исследований использовалась установка, схема которой показана на рис. 2. Рабочий участок располагался в герметичной

рабочей камере со смотровыми окнами. На рис. 3 показана фотография рабочей камеры. Проволочка – I нагревалась при пропускании через неё постоянного

электрического тока. Как нагревательный элемент рабочего участка использовалась хромелевая проволока диаметром $0,28 \pm 0,01$ мм, длиной $L=40 \pm 0,05$ мм. Проволочка припаивалась серебряным припоем к медным токоподводам – 3 толщиной 2 мм и шириной 5 мм. Оба токоподвода жёстко закреплялись на электроизолирующей пластине из фторопласта – 5 толщиной 14 мм. Пластина – 5 крепилась к монтажному кольцу – 4 из нержавеющей стали шириной 14 мм. С помощью монтажного кольца – 4 рабочий участок – 1 устанавливался горизонтально в корпусе рабочей камеры – 11 длиной 90 мм. Конструкция рабочего участка позволила выполнить тарировку рабочего участка как датчика температуры и провести отбор проволочек для опытов. Для дальнейших экспериментов была выбрана проволочка с минимальным количеством «дефектов» на её поверхности, которые обычно являются активными центрами вскипания (газообразования). Дальнейшие опыты проводились с проволочкой, для которой вскипание в перегретом пристенном слое жидкости чистого C₃H₆O не начиналось в течение 80 с при перегреве на 40 К выше температуры насыщения и в течение 20 с при перегреве на 120 К.

В рабочей камере – 11 были установлены два смотровых окна – 10 диаметром 90 мм, которые использовались для визуализации исследуемых процессов. Для создания равномерного освещения рабочего участка были применены: источник света – 7, оптическое стекло с равномерным затемнением – 9 и рассеиватель света – 8. Фото-видеосъёмка производилась с помощью цифровой фотокамеры Casio EX-F1 – 6. Значение скорости видеосъёмки с точностью до 0,1 кадр/с определялось при съёмке экрана электронного секундомера. По результатам обработки видеоматериалов определялись положение и скорость движения отдельных пузырьков, которые визуальнo можно выделить на проволочке рабочего участка. Вертикальная координата y отсчитывалась от середины проволочки, а горизонтальная координата x отсчитывалась от края правого токоподвода – 3. При обработке кадров предполагалось, что пузырёк имеет форму эллипсоида вращения с продольным (вдоль оси вращения) размером h_1 и поперечным размером h_2 , соответственно, объём пузырька V_b вычислялся по формуле:

$$V_b = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{h_1 \cdot h_2^2}{8}$$

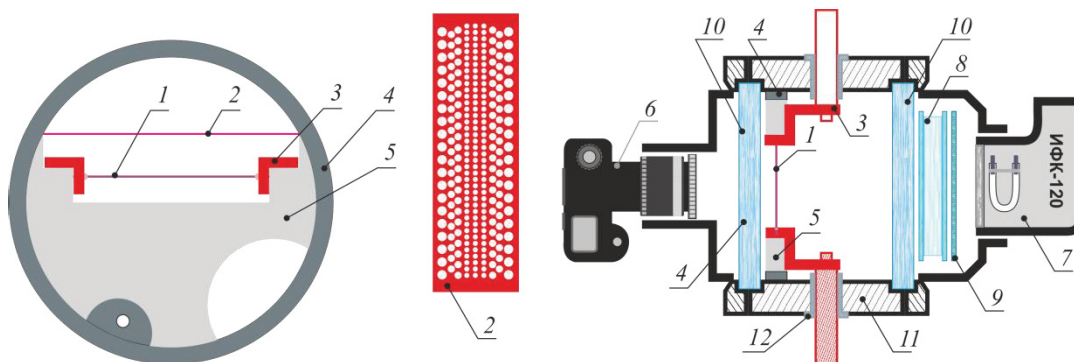


Рис. 2. Схема установки и рабочего участка: 1 – проволочный нагреватель; 2 – перфорированная пластина; 3 – токоподводы; 4 – монтажное кольцо; 5 – электроизолирующая пластина; 6 – фотоаппарат; 7 – импульсный источник света; 8 – рассеиватель света; 9 – оптическое стекло с равномерным затемнением; 10 – смотровые окна; 11 – корпус рабочей камеры; 12 – герметичные электроизоляторы

Fig. 2. Scheme of installation and working area: 1 – wire heater; 2 – perforated plate; 3 – current leads; 4 – mounting ring; 5 – electrical insulating plate; 6 – camera; 7 – flash light source; 8 – light diffuser; 9 – evenly shaded optical glass; 10 – viewing windows; 11 – working chamber body; 12 – sealed electrical insulators

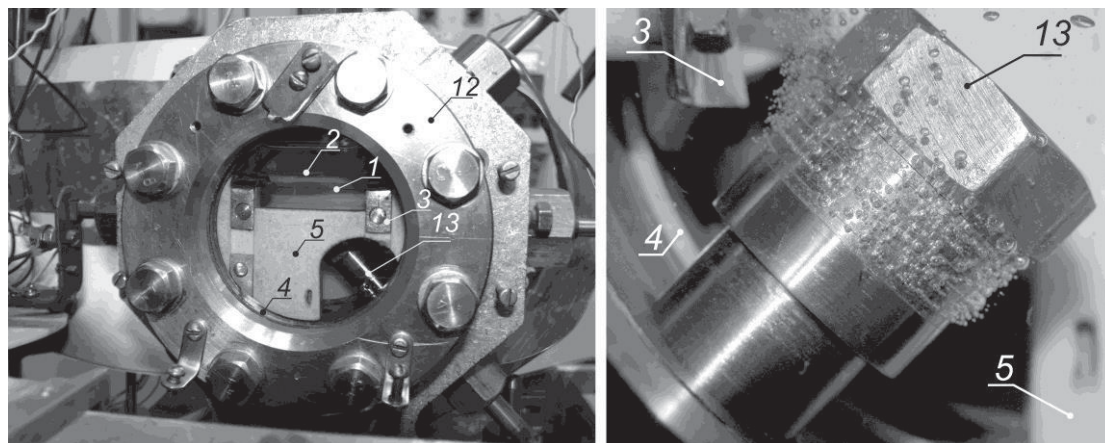


Рис. 3. Фотография рабочей камеры. Обозначения – на рис. 2, 13 – барботёр

Fig. 3. Photo of the working chamber. See designations in Fig. 2, 13 – bubbler

На расстоянии 6 мм выше проволоочки размещалась перфорированная пластина – 2 из медной фольги толщиной 50 мкм. Перфорированная пластина с отверстиями разного диаметра использовалась в опытах для определения массовой концентрации $\theta_{C_3H_6O}$ паров C₃H₆O в пузырьках. Перед насыщением углекислым газом жидкость дегазировалась для удаления растворённого в жидкости воздуха. Для создания насыщенного раствора C₃H₆O-CO₂ и поддержания состояния насыщения использовался барботёр – 13 с высоким значением гидравлического сопротивления. Барботёр располагался на 20 мм ниже уровня рабочего участка, обеспечивая условия насыщения жидкости углекислым газом (рис. 3).

Изменяя величину тепловой нагрузки и время разогрева проволоочки, были получены требуемые значения температуры пристенного слоя жидкости. Измерение напряжения на рабочем участке и тока через него проводилось с помощью подключённого к компьютеру 14-ти разрядного АЦП. На рис. 4 показаны результаты тарировки для установленной в рабочий участок хромелевой проволоочки. Для температур до 310 К тарировка проводилась в жидком этаноле, а для температур до 420 К – в глицерине. Данные для зависимости температуры T от измеренного значения

удельной электропроводности $\rho_{эл}$ материала проволоочки с точностью $\pm 1,5$ К можно аппроксимировать полиномом второй степени в диапазоне температур от 280 до 420 К:

$$T = 3,632 \cdot 10^{15} \rho_{эл}^2 + 1,434 \cdot 10^9 \rho_{эл} - 322,161. \quad (2)$$

Для более узких диапазонов температур точность измерений удельной электропроводности составляет $\pm 0,5$ К. Давление в жидкости $P_ж$ рассчитывалось с учётом высоты столба жидкости h , температуры $T_ж$ и давления в рабочей камере $P_к$:

$$P_ж = P_к + \rho_{C_3H_6O}(T_ж) \cdot g \cdot h,$$

где $\rho_{C_3H_6O}$, [кг/м³] – плотность жидкого C₃H₆O, $g=9,8154$, [м/с²] (значение для города Новосибирска). Давление в пузырьке P_b вычислялась по формуле с учётом кривизны пузырька и поверхностного натяжения:

$$P_b(T_ж) = P_ж + \sigma_{C_3H_6O}(T_ж) \cdot \left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \right),$$

где $\sigma_{C_3H_6O}$, [Н/м] – коэффициент поверхностного натяжения C₃H₆O.

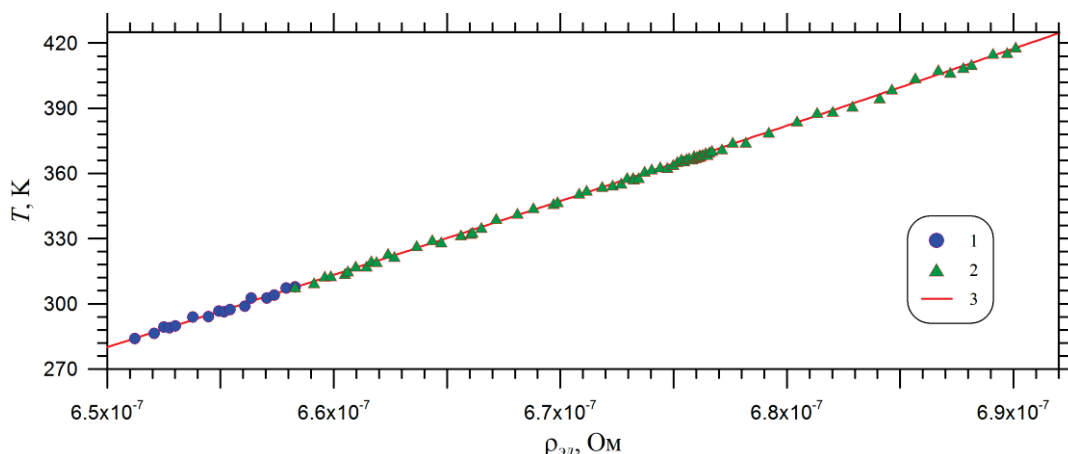


Рис. 4. Данные тарировочных измерений для определения зависимости температуры рабочего участка T от величины удельного электрического сопротивления $\rho_{эл}$ проволоочки: 1 – тарировка в этаноле, 2 – тарировка в глицерине, 3 – зависимость (2)

Fig. 4. Data of calibration measurements to determine the dependence of the temperature of the working section T on the value of electrical resistivity ρ_{el} of the wire: 1 – calibration in ethanol, 2 – calibration in glycerol, 3 – dependence (2)

В экспериментах измерялись температура жидкости в объёме рабочей камеры T_0 , температура проволоочки перед отключением электрообогрева T_w , температура проволоочки перед началом газовой выделением T_g , давление в жидкости на уровне рабочего участка P_w и на уровне перфорированной пластины P_p , количество тепла, выделившегося на проволоочке Q до момента отключения тока, время от момента включения до момента отключения электрообогрева проволоочки t_Q , время от момента отключения тока до момента начала газовой выделением t_{hg} , время от момента начала газовой выделением t_g . Численные значения теплофизических свойств для C₃H₆O, CO₂ в жидком и газообразном состоянии в зависимости от T и P вычислялись на основе справочных данных из работ [23, 24].

Для оценки степени метастабильности раствора при давлении P_w использовался безразмерный параметр Ψ :

$$\Psi = \frac{C_{CO_2}(P_w, T_0) - C_{CO_2}(P_w, T_g)}{C_{CO_2}(P_w, T_g)},$$

который показывает, во сколько раз избыточная концентрация $[C_{CO_2}(P_w, T_0) - C_{CO_2}(P_w, T_g)]$ в перегретом слое при температуре T_g больше значения равновесной концентрации $C_{CO_2}(P_w, T_g)$.

Для уменьшения влияния конвективных течений на степень насыщения в различных частях объёма жидкости эксперименты проводились при условии равенства температур жидкости, стенок рабочей ка-

меры и окружающего воздуха. При визуализации трудно отличить пузырьки газообразного CO₂ от паровых пузырьков C₃H₆O, поэтому исследование процесса газовыделения CO₂ проводилось в режиме охлаждения пристенного слоя жидкости после отключения тепловой нагрузки, когда вероятность вскипания жидкости снижается. Температура T_g, при которой начинается газовыделение, в наших опытах непосредственно не измерялась, так как газовыделение начиналось после отключения электронного нагрева проволоки рабочего участка. Поэтому для определения T_g использовалась эмпирическая формула, полученная на основании результатов измерений температуры проволоки при повторном включении электро-

нагрева проволоки через различные моменты времени t_g после первого отключения:

$$T_g = T_0 + \Delta T \cdot \exp \left[-\frac{t_g}{7,8 \cdot \exp(\Delta T / 57,5)} \right], \quad (3)$$

где ΔT=(T_w-T₀) – перегрев проволоки перед отключением электронного нагрева. На рис. 5 приведено сравнение результатов измерения температуры проволоки в различные моменты времени t_g после отключения электронного нагрева с расчётами по (3) для перегревов 22 и 74 К.

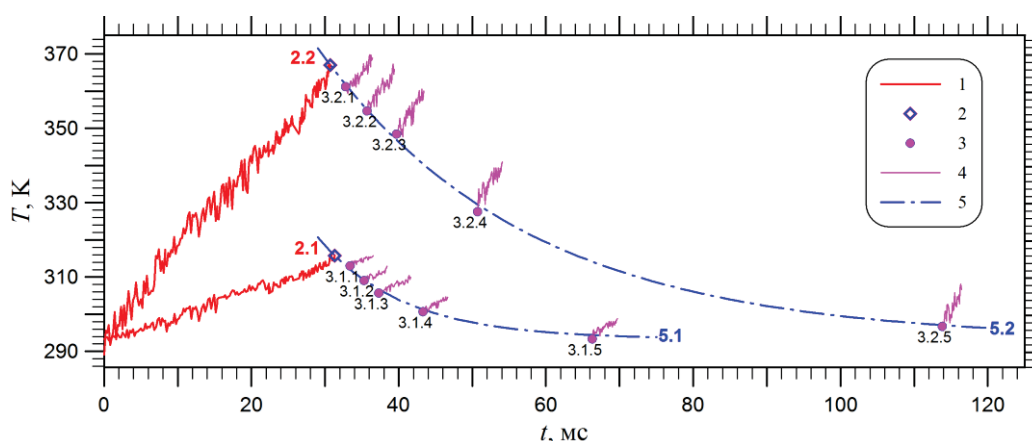


Рис. 5. Сравнение экспериментальных данных с зависимостью (3): 1 – режим разогрева проволоки, 2 – момент отключения электронного нагрева проволоки, 3 – момент повторного включения электронного нагрева проволоки, 4 – режим повторного разогрева проволоки, 5 – зависимость (3). 2.1 и 2.2 – перегрев рабочего участка на 22 и 74 К после отключения электронного нагрева; 3.1.1–3.1.5 – времена t_g после отключения 2, 4, 6, 12, 35 мс; 3.2.1–3.2.5 – времена t_g после отключения 2, 5, 9, 20, 83 мс; 5.1 и 5.2 – расчёты по (3) для перегревов 22 и 74 К

Fig. 5. Comparison of experimental data with dependence (3): 1 – wire heating mode, 2 – moment of switching off the electrical heating of the wire, 3 – moment of re-enabling the electric heating of the wire, 4 – mode of repeated heating of the wire, 5 – dependence (3). 2.1 and 2.2 – overheating of the working area by 22 and 74 K after switching off the electric heating; 3.1.1–3.1.5 – times t_g after tripping 2, 4, 6, 12, 35 ms; 3.2.1–3.2.5 – times t_g after tripping 2, 5, 9, 20, 83 ms; 5.1 and 5.2 – calculations according to (3) for overheatings of 22 and 74 K

Для разделения результатов с газовыделением CO₂ от результатов с кипением методика проведения экспериментов была адаптирована для определения массовой доли паров C₃H₆O в образующихся пузырьках

$$\theta_{C_3H_6O} = \frac{M_{C_3H_6O}}{M_{CO_2} + M_{C_3H_6O}} \quad (\text{где } M, [\text{кг}] - \text{масса})$$

по результатам обработки кадров видеосъёмки. Если температура жидкости в рабочей камере ниже температуры насыщения C₃H₆O, то величину θ_{C₃H₆O} можно оценить, используя данные по изменению объёма пузырьков V_b в различные моменты времени t_g после начала газовыделения. При больших временах t_g температура газа в пузырьке равна температуре жидкости в рабочей камере T₀, а давление паров C₃H₆O равно давлению насыщения при температуре T₀. Зная объём V_b(T₀) и давление в пузырьке около перфорированной пластины P_b(T₀, P_v) = P_{CO₂}(T₀) + P_{C₃H₆O}^{насыщения}(T₀), используя уравнение состояния ρ_{CO₂}[P_{CO₂}(T₀), T₀], можно вычислить массу углекислого газа в пузырьке M_{CO₂}:

$$M_{CO_2} = V_b(T_0) \cdot \rho_{CO_2}(P_{CO_2}(T_0), T_0).$$

Предполагая, что масса углекислого газа в пузырьке M_{CO₂} постоянна, можно рассчитать вес паров C₃H₆O M_{C₃H₆O} в пузырьке объёмом V_b(T_g) при температуре T_g из системы уравнений (4)–(8):

$$P_b(T_g) = P_{CO_2}(T_g) + P_{C_3H_6O}(T_g) = P_w + \sigma_{C_3H_6O}(T_g) \cdot \left(\frac{1}{h_{b1}} + \frac{1}{h_{b2}} \right), \quad (4)$$

$$P_{CO_2}(T_g, V_b(T_g)) = \rho_{CO_2}(P_{CO_2}, T_g) \cdot R_{CO_2} \cdot T_g, \quad (5)$$

$$M_{CO_2} = V_b(T_g) \cdot \rho_{CO_2}(P_{CO_2}, T_g), \quad (6)$$

$$P_{C_3H_6O}(T_g, V_b(T_g)) = P_b(T_g) - P_{CO_2}(T_g) = \rho_{C_3H_6O}(P_{C_3H_6O}, T_g) \cdot R_{C_3H_6O} \cdot T_g, \quad (7)$$

$$M_{C_3H_6O} = V_b(T_g) \cdot \rho_{C_3H_6O}(P_{C_3H_6O}, T_g). \quad (8)$$

Здесь ρ'' , [кг/м³] – плотность газа в пузырьке; P_w , [Па] – давление на уровне проволоочки; M_{CO_2} , $M_{C_3H_6O}$, [кг] – масса газа CO₂ и паров C₃H₆O в пузырьке; R_{CO_2} и $R_{C_3H_6O}$, [Дж/К] – газовые постоянные для CO₂ и паров C₃H₆O. Сопоставляя экспериментальные данные с результатами расчётов для различных значений $V_b(T_g)$ (4)–(8), можно определить значение концентрации $\theta_{C_3H_6O}$ в пузырьке. При давлениях в рабочей камере P больше 80 кПа равновесное значение $\theta_{C_3H_6O}$, соответствующее температуре жидкости, устанавливается за время порядка 50 мс. Для этого была проведена серия экспериментов по газовыделению в растворе

C₃H₆O-N₂ (диметилкетон-азот). Так как растворимость N₂ в C₃H₆O в 50–80 раз меньше, чем растворимость CO₂, то после вскипания в парогазовой полости весовая концентрация $\theta_{N_2} \leq 1\%$, $\theta_{C_3H_6O} \geq 99\%$, тогда как равновесная концентрация паров C₃H₆O в пузырьке при температуре 295 К $\theta_{C_3H_6O} \sim 20\%$. На рис. 6 приведены фотографии парогазовой полости через 5 и 34 мс после вскипания. Видно, что уже через 30 мс в объёме жидкости остались только мелкие пузырьки размером порядка 60–200 мкм, для которых расчётные значения $\theta_{C_3H_6O} \sim 20\text{--}30\%$, что соответствует равновесным значениям.

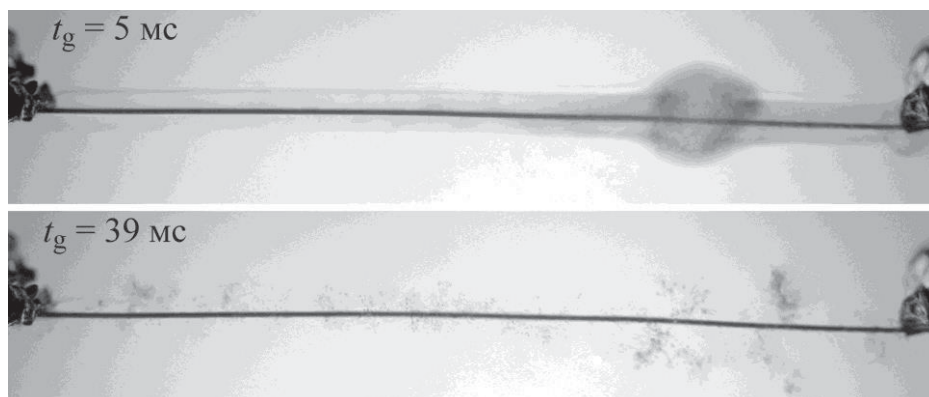


Рис. 6. Образование и конденсация парогазовой плёнки в растворе C₃H₆O-N₂ (весовая концентрация паров в плёнке: $\theta_{C_3H_6O} \geq 99$, $\theta_{N_2} \leq 0,01$). Фотографии рабочего участка для двух моментов времени $t_g=5$ и 35 мс, $t_{hg} = -89$ мс. Раствор C₃H₆O-N₂, $T_0=295,1$ К, $T_g=387,0$ К, $P_w=99,1$ кПа, $Q=2140$ Дж, $t_Q=182$ мс

Fig. 6. Formation and condensation of a gas-vapor film in C₃H₆O-N₂ solution (weight concentration of vapors in the film: $\theta_{C_3H_6O} \geq 99$, $\theta_{N_2} \leq 0,01$). Photographs of the working area for two time points $t_g=5$ and 35 ms, $t_{hg} = -89$ ms. C₃H₆O-N₂ solution, $T_0=295,1$ K, $T_g=387,0$ K, $P_w=99,1$ kPa, $Q=2140$ J, $t_Q=182$ ms

На рис. 7 для примера показано, как изменяется объём пузырька углекислого газа V_b , растущего в перегретом слое раствора C₃H₆O-CO₂, когда максимальная концентрация паров C₃H₆O в пузырьке порядка 11 %. Из набора всплывающих пузырьков выбирались те пузырьки, которые задерживались около перфорированной

пластины. Поэтому на графике используется обратный отсчёт времени. После отрыва пузырька от проволоочки концентрация паров C₃H₆O в пузырьке достигает равновесного значения $\theta_{C_3H_6O} \sim 6\%$, соответствующего температуре жидкости на уровне перфорированной

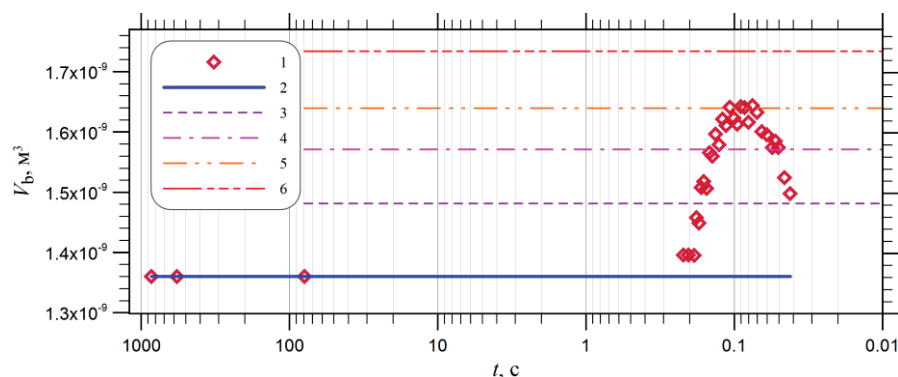


Рис. 7. Изменение объёма пузырька в зависимости от времени: 1) экспериментальные данные для раствора C₃H₆O-CO₂, $T_0=298,1$ К, $T_g=324,8$ К, $P_w=258,9$ кПа, $Q=1067$ Дж, $t_Q=56$ мс, $\Psi=1,15$, $V_b=1,36 \cdot 10^{-9}$ м³ при $t_g > 590$ с. Линии – расчёт объёма пузырька V_b из системы уравнений (4)–(8); 2) $\theta_{C_3H_6O}=6\%$, $T=298$ К; 3) $\theta_{C_3H_6O}=6\%$, $T=325$ К; 4) $\theta_{C_3H_6O}=9\%$, $T=325$ К; 5) $\theta_{C_3H_6O}=11\%$, $T=325$ К; 6) $\theta_{C_3H_6O}=14\%$, $T=325$ К

Fig. 7. Change in bubble volume depending on time: 1) experimental data for C₃H₆O-CO₂ solution, $T_0=298,1$ K, $T_g=324,8$ K, $P_w=258,9$ kPa, $Q=1067$ J, $t_Q=56$ ms, $\Psi=1,15$, $V_b=1,36 \cdot 10^{-9}$ m³ at $t_g > 590$ s. The lines are the calculation of the bubble volume V_b from the system of equations (4)–(8); 2) $\theta_{C_3H_6O}=6\%$, $T=298$ K; 3) $\theta_{C_3H_6O}=6\%$, $T=325$ K; 4) $\theta_{C_3H_6O}=9\%$, $T=325$ K; 5) $\theta_{C_3H_6O}=11\%$, $T=325$ K; 6) $\theta_{C_3H_6O}=14\%$, $T=325$ K

Результаты и их обсуждение

Проведены эксперименты по изучению процессов выделения газообразного CO₂ из раствора C₃H₆O-CO₂ в метастабильном слое жидкости около проволоочки диаметром 0,28 мм. Опыты проводились в условиях естественной конвекции при давлении в рабочем объёме от 40 до 260 кПа.

На основе полученных экспериментальных результатов обнаружено, что даже при высоких уровнях перенасыщения жидкости газом режим независимого появления газовых пузырьков в различных точках на

проволочке при малом количестве активных центров газообразования маловероятен. В наших экспериментах такой режим наблюдался только при искусственном создании центров газообразования. На рис. 8 показана фотография рабочего участка со «случайным» распределением газовых пузырьков на поверхности проволоочки при значении безразмерного параметра $\Psi=1,05$. В этом случае газовыделение начиналось на микропузырьках, которые остались на поверхности проволоочки после отрыва газовых пузырьков в предыдущем опыте, проведённом 25 минут назад.

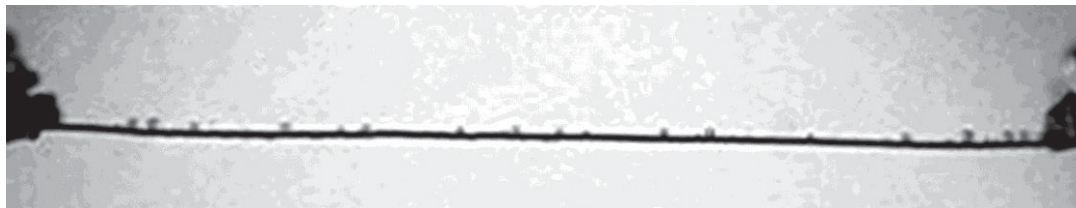


Рис. 8. Режим «случайного (независимого) появления газовых пузырьков на поверхности проволоочки». Фотография рабочего участка для момента времени $t_g=40$ мс, $t_{hg}=18$ мс. Раствор C₃H₆O-CO₂, $T_0=292,2$ К, $T_g=297,6$ К, $P_w=154,9$ кПа, $Q=1225$ Дж, $t_Q=42$ мс, $\Psi=1,05$

Fig. 8. Mode of «random (independent) appearance of gas bubbles on the wire surface». Photograph of the working area for the time $t_g=40$ ms, $t_{hg}=18$ ms. C₃H₆O-CO₂ solution, $T_0=292,2$ K, $T_g=297,6$ K, $P_w=154,9$ kPa, $Q=1225$ J, $t_Q=42$ ms, $\Psi=1,05$

При значении безразмерного параметра метастабильности $\Psi>1$ выделение газообразного CO₂ из раствора C₃H₆O-CO₂ происходит в режиме последовательного появления нового пузырька в зоне «чистой жидкости» около растущего пузырька «инициатора». Таким образом, увеличение размера области газоразделения на проволоочке происходит в режиме цепной

активации центров газоразделения. На рис. 9 приведена фотография рабочего участка, где показана зона газоразделения на проволоочке для режима цепной активации центров газоразделения через 507 мс после начала процесса выделения газообразного CO₂ при значении безразмерного параметра $\Psi=1,63$.

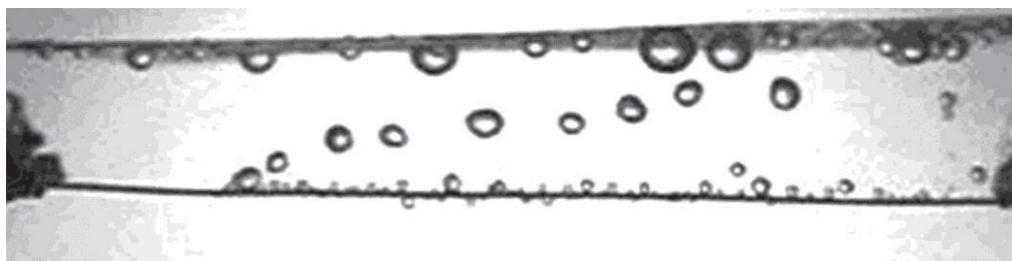


Рис. 9. Режим «цепной активации центров газоразделения на поверхности проволоочки». Фотография рабочего участка для момента времени $t_g=507$ мс, $t_{hg}=8$ мс. Раствор C₃H₆O-CO₂, $T_0=292,6$ К, $T_g=311,5$ К, $P_w=157,3$ кПа, $Q=1108$ Дж, $t_Q=38$ мс, $\Psi=1,63$

Fig. 9. Mode of «chain activation of gas evolution centers on the wire surface». Photograph of the working area for the time $t_g=507$ ms, $t_{hg}=8$ ms. C₃H₆O-CO₂ solution, $T_0=292,6$ K, $T_g=311,5$ K, $P_w=157,3$ kPa, $Q=1108$ J, $t_Q=38$ ms, $\Psi=1,63$

Скорость распространения границы зоны газоразделения зависит от времени задержки появления нового пузырька от момента появления пузырька-«инициатора». Качественно можно выделить два режима газоразделения. Первый режим – это «медленная инициализация», когда новый пузырёк появляется после того, как пузырёк-«инициатор» успевает вырасти до размеров порядка диаметра проволоочки (большое время задержки и пузырёк «нанисан» на проволоочку или успевает перейти в режим отрыва от проволоочки). Пример положения зоны газоразделения для первого режима показан на рис. 9. Второй режим – это «быстрая инициализация», когда

новый пузырёк появляется на начальной стадии роста пузырька-«инициатора» и его размеры заметно меньше диаметра проволоочки (короткое время задержки и пузырёк «сидит» на проволоочке). На рис. 10 приведена фотография рабочего участка, где показана зона газоразделения на проволоочке для режима цепной активации центров газоразделения – «быстрая инициализация» – через 37 мс после начала процесса выделения газообразного CO₂ при значении безразмерного параметра $\Psi=2,63$. В этом случае скорость распространения границы зоны газоразделения более чем в два раза выше, чем для случая $\Psi=1,63$.

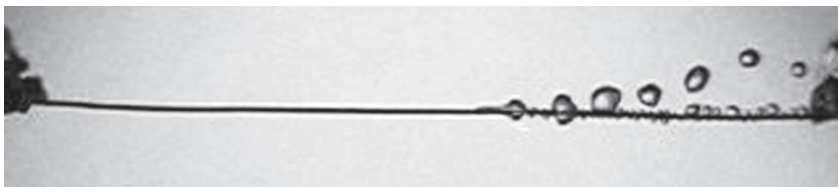


Рис. 10. Режим «цепной активации центров газовыделения на поверхности проволоочки», подрежим «быстрой инициализации». Фотография рабочего участка для момента времени $t_g=37$ мс, $t_{hg}=3$ мс. Раствор $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}-\text{CO}_2$, $T_0=291,9$ К, $T_g=334,3$ К, $P_w=151,6$ кПа, $Q=1603$ Дж, $t_Q=159$ мс, $\Psi=2,43$

Fig. 10. Mode of «chain activation of gas evolution centers on the surface of the wire», «quick initialization» submode. Photograph of the working area for the time $t_g=37$ ms, $t_{hg}=3$ ms. $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}-\text{CO}_2$ solution, $T_0=291,9$ K, $T_g=334,3$ K, $P_w=151,6$ kPa, $Q=1603$ J, $t_Q=159$ ms, $\Psi=2,43$

При давлении в рабочей камере P больше 140 кПа и при значении безразмерного параметра $\Psi > 3$ процесс выделения газообразного CO_2 из раствора $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}-\text{CO}_2$ качественно изменяется. Увеличение размеров области газовыделения происходит не за счёт появления новых центров газовыделения, а в результате увеличения объёма газовой полости. При этом скорость роста газовой полости вдоль проволоочки на порядок больше скорости роста в поперечном направлении, в результате чего на рабочем участке формируется газовая плёнка. Концентрация паров $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ в такой плёнке $\theta_{\text{C}_3\text{H}_6\text{O}} \leq 13\%$. Поэтому можно предположить, что при $\Psi > 3$ выделение газообразного CO_2 из раствора $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}-\text{CO}_2$ может происходить в ре-

жиме «плёночного газовыделения». В этом режиме, по всей видимости, в жидкости около межфазной границы формируется ступенчатый профиль распределения концентрации CO_2 , а не экспоненциальный, как для случая диффузионного роста газового пузырька в перенасыщенном растворе. На рис. 11 приведены три фотографии рабочего участка в различные моменты времени, демонстрирующие процесс выделения CO_2 в режиме «плёночного газовыделения» при значении безразмерного параметра $\Psi=7,64$. Следует отметить, что в этом режиме продольная скорость роста газовой плёнки больше скорости распространения границы зоны газовыделения для режима «быстрая инициализация», представленного на рис. 10.

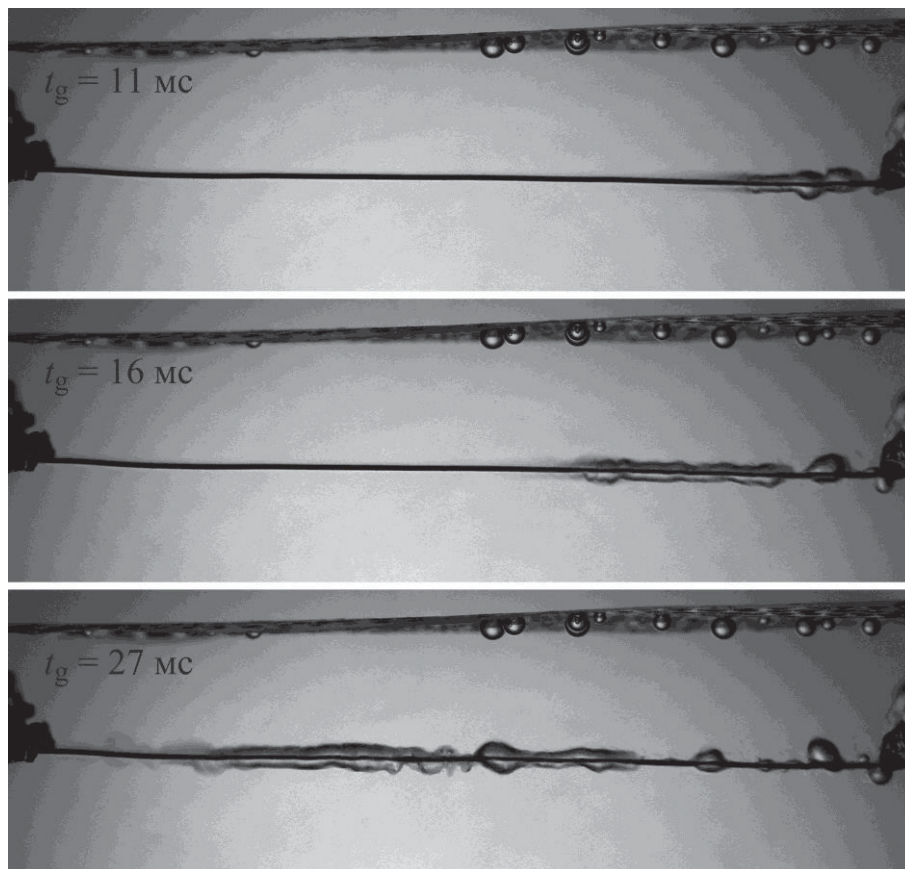


Рис. 11. Режим «плёночного газовыделения». Фотографии рабочего участка для трёх моментов времени $t_g=11$, 16 и 27 мс, $t_{hg}=7$ мс. Раствор $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}-\text{CO}_2$, $T_0=294,3$ К, $T_g=369,0$ К, $P_w=161,2$ кПа, $Q=1194$ Дж, $t_Q=90$ мс, $\Psi=7,64$

Fig. 11. Mode of «film gas evolution». Photographs of the working area for three time points $t_g=11$, 16 and 27 ms, $t_{hg}=7$ ms. $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}-\text{CO}_2$ solution, $T_0=294,3$ K, $T_g=369,0$ K, $P_w=161,2$ kPa, $Q=1194$ J, $t_Q=90$ ms, $\Psi=7,64$

Сопоставляя данные по изменению размеров зоны газовой выделению для режима цепной активации центров газовой выделению с изменением длины газовой плёнки было замечено, что скорости движения области, занятой газовой выделением CO₂, отличаются на порядок для различных режимов. На рис. 12 показано, как со временем изменяются границы зоны газовой выделению x на рабочем участке для трёх режимов выделения газовой выделению CO₂ из раствора C₃H₆O-CO₂. Видно, что скорость движения границы

для всех режимов практически постоянна во времени (на графике проведены линии, описывающие движение с постоянной скоростью 0,08, 0,34 и 1,3 м/с). Наибольшая скорость 1,3 м/с соответствует данным для режима «плёночного газовой выделению», а наименьшая 0,08 м/с – данным для режима «медленной инициализации». Для режимов «медленной инициализации» и «быстрой инициализации» скорость движения границы зоны газовой выделению различается в три раза: 0,08 и 0,34 м/с.

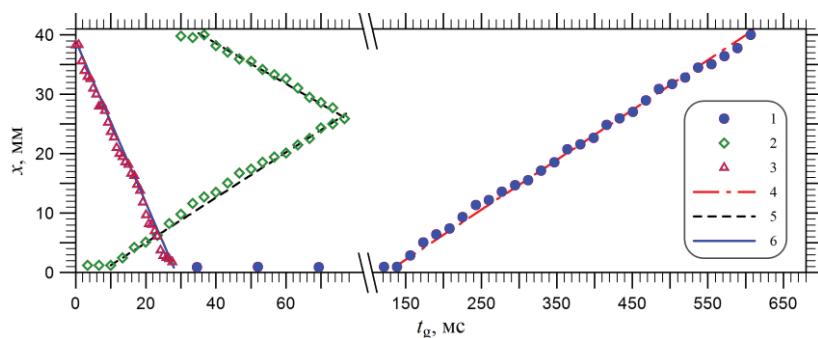


Рис. 12. Изменение границы зоны газовой выделению на рабочем участке для различных режимов выделения газа. Раствор C₃H₆O-CO₂, 1) режим «медленной инициализации» $T_0=292,6$ К, $T_g=326,1$ К, $\Psi=1,63$; 2) режим «быстрой инициализации» $T_0=291,9$ К, $T_g=334,3$ К, $\Psi=2,43$; 3) режим «плёночного газовой выделению» $T_0=297,5$ К, $T_g=361,1$ К, $\Psi=3,72$; 4–6) скорость движения границы газовой выделению: 0,08; 0,34; 1,3 м/с, соответственно

Fig. 12. Changing the boundary of the gas release zone in the working area for different modes of gas release. C₃H₆O-CO₂ solution, 1) «slow initialization» mode $T_0=292,6$ K, $T_g=326,1$ K, $\Psi=1,63$; 2) «fast initialization» mode $T_0=291,9$ K, $T_g=334,3$ K, $\Psi=2,43$; 3) film outgassing mode $T_0=297,5$ K, $T_g=361,1$ K, $\Psi=3,72$; 4–6) speed of movement of gas evolution border: 0,08; 0,34; 1,3 m/s, respectively

Газовые плёнки – это неустойчивая структура, и со временем на поверхности газовой плёнки развиваются волны большой амплитуды, что приводит к разрыву плёнки и формированию на проволочке отдельных пузырей. Ранее упоминалось, что газовой выделению трудно отличить от кипения, при определенных условиях эти процессы могут сосуществовать вместе. В экспериментах при давлении в рабочей камере порядка 100–200 кПа наблюдались плёнки, в которых концентрация паров $\theta_{C_3H_6O}$ и газа θ_{CO_2} были соизмеримы между собой (рис. 13). Наблюдаемые парогазовые плёнки отличались большей устойчивостью поверх-

ности, чем газовые, где $\theta_{C_3H_6O} \leq 15$ %. По-видимому, это связано с тем, что неустойчивость поверхности газовой плёнки возникает вследствие охлаждения газа из-за контакта с более холодными слоями жидкости при расширении плёнки в поперечном направлении. Присутствие в плёнке паров жидкости поддерживает температуру границы на уровне температуры насыщения, а наличие неконденсирующегося газа замедляет процесс конденсации паров, что в итоге и приводит к более высокой степени устойчивости поверхности парогазовых плёнок.

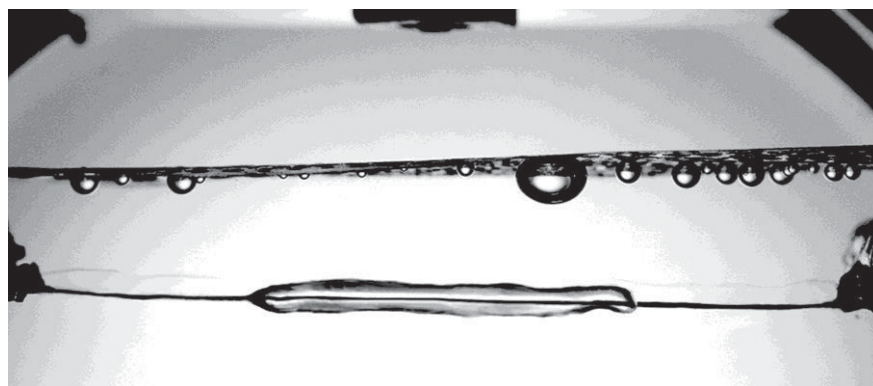


Рис. 13. Парогазовая плёнка в растворе C₃H₆O-CO₂ ($\theta_{C_3H_6O} \approx 65$ %, ($\theta_{CO_2} \approx 35$ %)). Фотография рабочего участка для момента времени $t_g=12$ мс, $t_{hg}=-3$ мс. Раствор C₃H₆O-CO₂, $T_0=291,1$ К, $T_g=321,4$ К, $P_w=98,9$ кПа, $Q=2608$ Дж, $t_Q=216$ мс, $\Psi=1,67$

Fig. 13. Vapor-gas film in C₃H₆O-CO₂ solution ($\theta_{C_3H_6O} \approx 65$ %, ($\theta_{CO_2} \approx 35$ %)). Photograph of the working area for the time $t_g=12$ ms, $t_{hg}=-3$ ms. C₃H₆O-CO₂ solution, $T_0=291,1$ K, $T_g=321,4$ K, $P_w=98,9$ kPa, $Q=2608$ J, $t_Q=216$ ms, $\Psi=1,67$

Таким образом, полученные экспериментальные данные указывают на то, что особенности процесса выделения газообразного CO₂ зависят от степени метастабильности раствора C₃H₆O-CO₂, когда переход в метастабильное состояние происходит при быстром увеличении температуры раствора.

Заключение

Показано, что при малом количестве активных центров газообразования даже при высоких уровнях метастабильности раствора C₃H₆O-CO₂ режим независимо появления газовых пузырьков CO₂ в различных точках на проволочке маловероятен. Показано, что при значении безразмерного параметра метастабильности $1 < \Psi < 3$ выделение газообразного CO₂ из раствора C₃H₆O-CO₂ происходит в режиме последовательного появления нового пузырька в зоне «чистой жидкости» около растущего пузырька-«инициатора»; размер области газовыделения на проволочке увеличивается в режиме цепной активации центров газовыделения; изменяется скорость движения границы зоны газовыделе-

ния вдоль нагревателя в зависимости от задержки по времени появления нового пузырька от момента появления пузырька-«инициатора». Показано, что при значении безразмерного параметра метастабильности $\Psi > 3$ и давлении в объёме больше 140 кПа выделение газообразного CO₂ из раствора C₃H₆O-CO₂ происходит в режиме «плёночного газовыделения», при котором увеличение размеров области газовыделения происходит не за счёт появления новых центров газовыделения, а в результате увеличения объёма газовой полости. При этом скорость роста газовой полости вдоль проволочки на порядок больше скорости роста в поперечном направлении, в результате чего на рабочем участке формируется газовая плёнка. Показано, что скорости движения области, занятой газообразным CO₂, различаются на порядок для различных режимов при том, что скорость движения границы газовыделения для всех режимов практически постоянна во времени.

Работа выполнена в рамках государственного контракта Института теплофизики СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы увеличения нефтеотдачи на месторождениях Югры / С.Г. Кузьменков, Р.Ш. Аюпов, М.В. Новиков, В.И. Исаев, Г.А. Лобова, П.А. Стулов, В.С. Бутин, Е.О. Астапенко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 96–106. DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2597.
2. Исследование фильтрационных характеристик и эффективности вытеснения нефти при заводнении морского месторождения с тяжелой нефтью / Се Кун, Мэй Цзе, Нажису, В.И. Ерофеев, Су Ченг, Цзян Вэйдун, Лу Сянго // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 105–114. DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2855.
3. Наговицына Н.П., Дерендяев Р.А. Формирование методологического подхода исследования поверхностно-активных веществ для увеличения нефтеотдачи пластов (на примере месторождения Удмуртской республики) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 202–211. DOI: 10.18799/24131830/2020/7/2730.
4. Фарунцев С.Д. Опыт применения методов математического моделирования для построения комплексных моделей управления объектами промышленной подготовки нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 12. – С. 7–21. DOI: 10.18799/24131830/2021/12/3344.
5. Применение углекислого газа в добыче нефти / В. Балинт, А. Бан, Ш. Долешал, П.И. Забродин, Я. Терек. – М.: Недра, 1977. – 240 с.
6. Трухина О.С., Синцов И.А. Опыт применения углекислого газа для повышения нефтеотдачи пластов // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 3. – С. 205–209.
7. Сургучев М.Л. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов. – М.: Недра, 1985. – 308 с.
8. Тимошенко В.И., Кнышенко Ю.В. Влияние газонасыщенности жидкости на неустановившиеся процессы течения в трубопроводных системах // Техническая механика. – 2010. – № 4. – С. 34–43.
9. Ширшова А.В., Данько М.Ю. Рост и диссоциация газогидратов в водонефтяных эмульсиях // Известия вузов. Нефть и газ. – 2011. – № 5. – С. 95–101.
10. Волков П.В., Большунов А.В., Мостокалов К.А. Методическое и алгоритмическое обеспечение автоматизированной экспериментальной установки удаления гидратов в газоконденсатной смеси в трубопроводе // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 132–139. DOI: 10.18799/24131830/2021/04/3156.
11. Иванова М.С., Вишнецкая М.В., Томский К.О. Очистка газовых выбросов от CO₂ в среде трифторуксусной кислоты при добыче нефти и газа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 5. – С. 57–63. DOI: 10.18799/24131830/2020/5/2636.
12. Бутаков В.И., Слагада Е.А., Тихонравова Я.В. Содержание и состав атмосферных и парниковых газов в подземных льдах разного генезиса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 22–36. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3082.
13. Reducing uncertainties in decadal variability of the global carbon budget with multiple datasets / W. Lia, P. Ciaisa, Y. Wang, S. Penga, G. Broqueta, A.P. Ballantyneb, J.G. Canadellc, L. Cooperb, P. Friedlingsteind, C.L. Quéreé, R.B. Myrenif, G.P. Petersg, S. Piao, J. Pongratzi // PNAS Early Edition. – 2016. – № 1603956113. – P. 1–11. DOI: 10.1073/pnas.1603956113.
14. Шагапов В.Ш., Галева Г.Я. Взрывное истечение газонасыщенной жидкости из каналов и емкостей // Прикладная механика и техническая физика. – 1999. – Т. 40. – № 1. – С. 64–73.
15. Бахмат Г.В., Корнеева Н.С., Пахаруков Ю.В. Расчеты интенсивности газовыделения при выходе системы «жидкость-газ» из области неустойчивости // Вестник Тюменского государственного университета. Серия Физико-математические науки. Информатика. – 2011. – № 7. – С. 59–63.
16. Vogt H., Aras O., Balzer R.J. The limits of the analogy between boiling and gas evolution at electrodes // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2004. – V. 47. – P. 787–795. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.07.023.
17. Zhukov S.A., Barelko V.V. Dynamic and structural aspects of the processes of single-phase convective heat transfer metastable regime decay and bubble boiling formation // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1992. – V. 35. – № 4. – P. 759–775. DOI: 10.1016/0017-9310(92)90244-M
18. Some peculiarities of heat transfer crisis in alkali metals boiling under free convection / S.S. Kutateladze, V.N. Moskvicheva, G.I. Bobrovich, N.N. Mamontova, B.P. Avksentyuk // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1973. – V. 16. – P. 705–713. DOI: 10.1016/0017-9310(73)90084-7
19. Vapor-liquid equilibrium, liquid density and excess enthalpy of the carbon dioxide + acetone mixture: Experimental measurements and correlations / G.E. Ramirez-Ramos, Y. Zgar, D. Salavera, Y. Coulier, K. Ballerat-Busserolles, A. Coronas // Fluid Phase Equilibria. – 2021. – V. 532. – P. 112915.1–112915.13.
20. High-pressure vapor-liquid equilibria of some carbon dioxide + organic binary systems / M.J. Lazzaroni, D. Bush, J.S. Brown,

- C.A. Eckert // Journal Chemical Engineering Data. – 2005. – V. 50. – P. 60–65.
21. Vapor-liquid equilibria of the carbon dioxide + acetone system at pressures from (2.36 to 11.77) MPa and temperatures from (333.15 to 393.15) K / F. Han, Y. Xue, Y. Tian, X. Zhao, L. Chen // Journal Chemical Engineering Data. – 2005. – V. 50. – P. 36–39.
22. Adrian T., Maurer G. Solubility of carbon dioxide in acetone and propionic acid at temperatures between 298 K and 333 K // Journal Chemical Engineering Data. – 1997. – V. 42. – P. 668–672.
23. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 721 с.
24. Edwards D.K. Heat exchanger design handbook. V. 5: Physical Properties. – New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1983. – 725 p.

Поступила 18.04.2022 г.

Прошла рецензирование 09.11.2022 г.

Информация об авторах

Дехтярь Р.А., кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт теплофизики СО РАН.

Овчинников В.В., кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт теплофизики СО РАН.

UDC 544.015.22

STUDY OF THE DYNAMICS OF GASEOUS CO₂ RELEASE IN A SUPERHEATED WALL LAYER OF C₃H₆O-CO₂ SOLUTION

Ruslan A. Dekhtyar¹,
dekhtyar@itp.nsc.ru

Valeriy V. Ovchinnikov¹,
avks@itp.nsc.ru

¹ S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS,
1, Acad. Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the work is caused by the fact that one of the ways to increase the oil recovery factor is using technologies with carbon dioxide as a displacing agent. Emission and absorption of carbon dioxide are the main factors affecting the rate of climate change on Earth. **The purpose** of the work is to study the features of carbon dioxide evolution in a highly superheated (metastable) layer of a C₃H₆O-CO₂ solution.

Object: solution of carbon dioxide CO₂ in dimethyl ketone C₃H₆O.

The methods: the method of visualization of gas release in a liquid. To create a layer of a metastable liquid, pulsed heating of a thin wire was carried out. Based on the results of digital processing of photo and video materials, the sizes and shape of the resulting carbon dioxide bubbles and the speed of movement of the boundary of the gas release zone along the wire were determined. It is difficult to distinguish bubbles of gaseous CO₂ from vapor bubbles of C₃H₆O on the frames. Therefore, to separate the data on boiling and gas release, the mass fraction of C₃H₆O vapors in the vapor-gas cavity was determined from the change in the bubble volume and using the equation of state for CO₂ and C₃H₆O.

The results. Depending on the degree of metastability of the near-wall layer of the C₃H₆O-CO₂ solution at pressure in the working volume from 40 to 260 kPa, experimental data were obtained, which made it possible to identify several modes of gas evolution. It is shown that at a low degree of metastability of the near-wall liquid layer, the evolution of gaseous CO₂ occurs in the mode of successive chain activation of gas evolution centers. At a high degree of metastability and pressure in the volume of more than 140 kPa, the evolution of gaseous CO₂ occurs in the mode of «film gas evolution». For all gas release modes, the rate of movement of the gas release boundary is practically constant in time, but for different gas release modes, the velocity values differ by an order of magnitude.

Key words:

Heterogeneous gas release, boiling, metastability, solution, phase transition.

The research was carried out within the State contract of Institute of Thermophysics SB RAS.

REFERENCES

- Kuzmenkov S.G. Enhanced oil recovery methods at fields of Yugra. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 4, pp. 96–106. In Rus.
- Xie K. Study on seepage characteristics and displacement efficiency of water flooding in offshore heavy oil reservoir. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 105–114. In Rus.
- Nagovitsyna N.P., Derendyaev R.A. Formation of a methodological approach for research of surface-active substances to enhanced oil recovery (on the example of deposit of the Udmurt republic). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 7, pp. 202–211. In Rus.
- Faruntsev S.D. Experience in application of mathematical modeling methods for elaboration of integrated control models of field treatment facilities. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 12, pp. 7–21. In Rus.
- Balint V., Ban A., Doleshal Sh., Zabrodin P.I., Terek Ya. *Primenenie uglekislogo gaza v dobyche nefii* [Application of carbon dioxide in oil production]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 240 p.
- Trukhina O.S., Sintsov I.A. Opyt primeneniya uglekislogo gaza dlya povysheniya nefteotdachi plastov [Experience of carbon dioxide usage for enhanced oil recovery]. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*, 2016, no. 3, pp. 205–209.
- Surguchev M.L. *Vtorichnye i tretichnye metody uvelicheniya nefteotdachi plastov* [Secondary and tertiary methods for enhanced oil recovery]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 308 p.
- Timoshenko V.I., Knyshenko Yu.V. Vliyaniye gazonasyschennosti zhidkosti na neustanovivshiesya protsessy techeniya v truboprovodnykh sistemakh [Influence of liquid gas saturation on unsteady flow processes in pipeline systems]. *Tekhnicheskaya mekhanika*, 2010, no. 4, pp. 34–43.
- Shirshova A.V., Danko M.Yu. Rost i dissotsiatsiya gazogidratov v vodoneftyanykh emulsiyakh [Growth and dissociation of gas hydrates in water-oil emulsions]. *Izvestiya vuzov. Neft i gaz*, 2011, no. 5, pp. 95–101.
- Volkov P.V., Bolshunov A.V., Mostokalov K.A. Methodological and algorithmic support of an automated experimental installation for removing hydrates in a gas-condensate fluid in a pipeline. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 4, pp. 132–139. In Rus.
- Ivanova M.S., Vishnetskaya M.V., Tomsky K.O. Cleaning gas emissions from CO₂ in the environment of trifluoroacetic acid during oil and gas production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 5, pp. 57–63. In Rus.
- Butakov V.I., Slagoda E.A., Tikhonravova Ya.V. Content and composition of atmospheric and greenhouse gases in underground ice of different genesis. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 22–36. In Rus.
- Lia W., Ciaisa P., Wanga Y., Penga S., Broqueta G., Ballantyne A.P., Canadelle J.G., Cooper L., Friedlingsteind P., Quéré C.L., Mylenif R.B., Peters G.P., Piao S., Pongratzi J. Reducing uncertainties in decadal variability of the global carbon budget with multiple datasets. *PNAS Early Edition*, 2016, no. 1603956113, pp. 1–11.
- Shagapov V.Sh., Galeeva G.Ya. Vzryvnoe istecheniye gazonasyschennoy zhidkosti iz kanalov i emkostey [Explosive outflow of gas-saturated liquid from channels and containers]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 1999, vol. 40, no. 1, pp. 64–73.

15. Bakhmat G.V., Korneeva N.S., Pakharukov Yu.V. Raschety intensivnosti gazovydeleniya pri vykhode sistemy «zhidkost–gaz» iz oblasti neustoychivosti [Calculations of the intensity of gas release at the exit of the "liquid-gas" system from the region of instability]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvenogo universiteta. Seriya Fiziko-matematicheskiye nauki. Informatika*, 2011, no. 7, pp. 59–63.
16. Vogt H., Aras O., Balzer R.J. The limits of the analogy between boiling and gas evolution at electrodes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, vol. 47, pp. 787–795.
17. Zhukov S.A., Barelko V.V. Dynamic and structural aspects of the processes of single-phase convective heat transfer metastable regime decay and bubble boiling formation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1992, vol. 35, no. 4, pp. 759–775.
18. Kutateladze S.S., Moskevicheva V.N., Bobrovich G.I., Mamontova N.N., Avksentyuk B.P. Some peculiarities of heat transfer crisis in alkali metals boiling under free convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1973, vol. 16, pp. 705–713.
19. Ramirez-Ramos G.E., Zgar Y., Salavera D., Coulier Y., Ballerat-Busserolles K., Coronas A. Vapor-liquid equilibrium, liquid density and excess enthalpy of the carbon dioxide + acetone mixture: experimental measurements and correlations. *Fluid Phase Equilibria*, 2021, vol. 532, pp. 112915.1–112915.13.
20. Lazzaroni M.J., Bush D., Brown J.S., Eckert C.A. High-pressure vapor-liquid equilibria of some carbon dioxide + organic binary systems. *Journal Chemical Engineering Data*, 2005, vol. 50, pp. 60–65.
21. Han F., Xue Y., Tian Y., Zhao X., Chen L. Vapor-liquid equilibria of the carbon dioxide + acetone system at pressures from (2.36 to 11.77) MPa and temperatures from (333.15 to 393.15) K. *Journal Chemical Engineering Data*, 2005, vol. 50, pp. 36–39.
22. Adrian T., Maurer G. Solubility of carbon dioxide in acetone and propionic acid at temperatures between 298 K and 333 K. *Journal Chemical Engineering Data*, 1997, vol. 42, pp. 668–672.
23. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Handbook on thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 721 p.
24. Edwards D.K. *Heat exchanger design handbook. Vol. 5: Physical Properties*. New York, Hemisphere Publ. Corporation, 1983. 725 p.

*Received: 18 April 2022.
Reviewed: 9 November 2022.*

Information about the authors

Ruslan A. Dekhtyar, Cand. Sc., senior researcher, S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS.

Valeriy V. Ovchinnikov, Cand. Sc., senior researcher, S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS.