

УДК 536.523.4

Исследование переходных режимов при абсорбции пара водным раствором бромида лития

Н.С. Буфетов, Р.А. Дехтярь, В.В. Овчинников

Институт теплофизики им. С.А. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: dekhtyar@itp.nsc.ru

Экспериментально исследуются переходные процессы на начальном этапе теплопереноса при абсорбции паров воды на поверхности 57,8-процентного водного раствора бромида лития в кювете диаметром 70 мм. Эксперименты проводились как с чистым раствором, так и с раствором, к которому добавлялось поверхностно-активное вещество (ПАВ) *n*-октанол. Показано, что при резком увеличении давления паров воды в объеме над поверхностью абсорбирующего раствора происходит возникновение локальных температурных неоднородностей на поверхности раствора. Скорость роста величины этих неоднородностей пропорциональна скорости роста давления паров воды. Обнаружено, что в отличие от раствора без ПАВ, где конвективное течение наблюдается только в коротком интервале времени после подачи водяного пара в абсорбер, в неподвижном слое водного раствора LiBr с добавлением ПАВ при абсорбции имеет место устойчивая термокапиллярная конвекция в приповерхностном слое раствора. Показано, что при переменном рельефе дна могут формироваться локализованные в пространстве зоны, где температура на поверхности раствора определяется формой рельефа дна.

Ключевые слова: абсорбция, раствор бромида лития, ПАВ, эффект Марангони, термокапиллярная конвекция, температурная неоднородность.

Введение

В современной энергетике и химической промышленности важными задачами являются интенсификация тепло- и массопереноса, а также поиск новых способов увеличения производительности энергетических аппаратов и машин абсорбционного типа — холодильной машины и теплового насоса. В таких аппаратах процесс абсорбции осуществляется чаще всего на пленках, стекающих по поверхностям, через которые отводится выделившееся при абсорбции тепло. Исследованию пленочной абсорбции посвящено большое количество теоретических [1–3] и экспериментальных работ [4–11].

Одним из эффективных способов управления процессами тепло- и массопереноса в указанных устройствах является введение в раствор поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые приводят к возникновению конвекции Марангони и, тем самым, к интенсификации процессов переноса. В 1959 году В.Г. Левич в своей книге [12] указывал на то, что возможно использование ПАВ с целью изменения поверхностного натяжения жидкости. Изменение поверхностного натяжения σ в свою очередь приводит к появлению на поверхности жидкости тангенциальных напряжений и тангенциальных капиллярных сил. Эти силы инициируют возникновение на поверхности жидкости конвективного

течения, известного как конвекция Марангони. Обычной причиной неоднородности поверхностного натяжения σ является его зависимость от температуры. Поскольку для большинства чистых жидкостей σ убывает с ростом температуры, термокапиллярное конвективное течение оказывается направленным в холодную область.

Изучение и наблюдение конвекции Марангони иногда затруднено наличием гравитационных конвективных течений, интенсивность которых в десятки раз выше. Однако в объемах жидкости с относительно протяженной свободной поверхностью и малым вертикальным размером объёмные силы оказываются малы по сравнению с поверхностными силами. В этом случае конвекция Марангони способна вносить существенный вклад в процессы теплообмена, а также влиять на форму свободной поверхности, вызывая её деформацию и даже перемещение всего объема жидкости в целом. В системах с межфазной границей конвективное движение Марангони может генерироваться поверхностными силами, возникающими при наличии градиентов поверхностного натяжения, обусловленных неоднородным распределением температуры или химического состава жидкости вдоль границы раздела.

Также в качестве одного из способов интенсификации процесса теплопереноса в современных аппаратах абсорбционного типа может быть использована организация регулярных и устойчивых пленок абсорбента, стекающих по различным развитым поверхностям, где толщина пленки может сильно варьироваться [13]. Изменение толщины пленки раствора позволяет оптимизировать характеристики теплового и диффузионного пограничных слоев. В работе [14] было экспериментально показано, что при определенной толщине пленки достигается значительно более высокая скорость абсорбции, чем при прочих. В работе [15] результаты моделирования показали, что наиболее важными параметрами, влияющими на скорость поглощения, являются толщина и скорость пленки раствора. Гидродинамика падающих пленок такова, что происходит образование относительно толстых пленок жидкости на трубках. Толстая пленка жидкости обладает значительным сопротивлением теплопереносу или термическим сопротивлением. Таким образом, толщина жидкой пленки играет важную роль в общей производительности абсорберов. Для интенсификации теплопереноса в жидкой пленке тонкая пленка раствора LiBr может быть механически ограничена. Поэтому более простым и удобным объектом исследования рассматриваемых процессов является, например, абсорбция водяного пара слоем раствора переменной глубины, когда вынужденное течение отсутствует.

В работе [16] была проведена визуализация течения, возникающего вследствие термокапиллярной конвекции. Были измерены скорость и продолжительность конвективного движения в слое водного раствора абсорбента с переменной глубиной. Во всех экспериментах с добавлением ПАВ наблюдалось интенсивное перемешивание жидкости как вертикальными, так и горизонтальными вихревыми движениями.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование переходных режимов при абсорбции неподвижным слоем водного раствора бромида лития после подачи пара с избыточным давлением в абсорбционную камеру, а также определение влияния добавок ПАВ и рельефа дна кюветы с раствором на развитие абсорбции.

Экспериментальная установка и условия экспериментов

Блок-схема экспериментальной установки и схема абсорбционной ячейки приведены на рис. 1, 2. Основным элементом установки является абсорбер, выполненный в виде вакуумной камеры 1 (рис. 2) из нержавеющей стали размером $150 \times 150 \times 100$ мм, в которую помещалась круглая прозрачная кювета 2 (абсорбционная ячейка) диаметром 70 мм и высотой 40 мм, заполненная водным раствором бромида лития (LiBr) 8. Для поддержания абсорбции водяной пар в абсорбер подавался через паропровод из парогенератора объемом 100 л, в котором с помощью системы управления и электропитания поддерживалось постоянное давление $P = 0,5 \div 2$ кПа. Процесс абсорбции начинался после

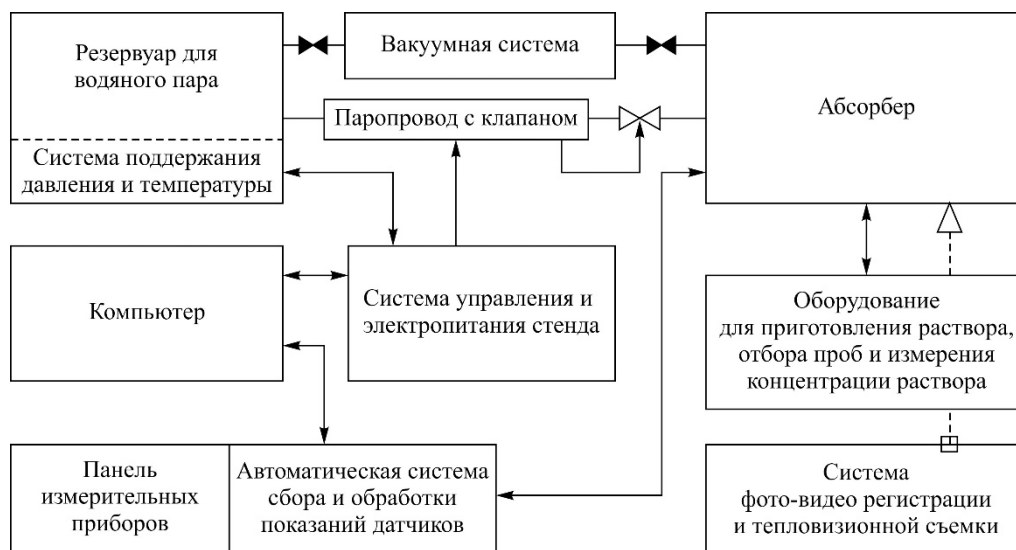
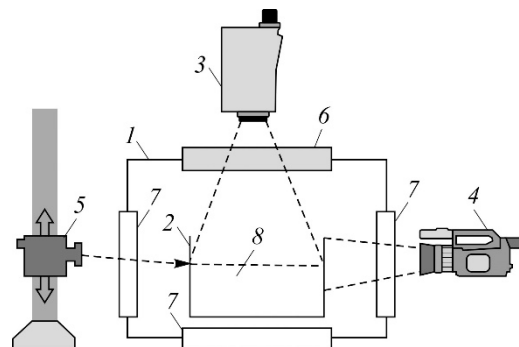


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

открытия клапана и поступления пара в вакуумную камеру. Для получения термограмм поверхности раствора при абсорбции использовалась тепловизионная (IR) камера NEC-TH7100 3. Съёмка тепловизором выполнялась через прозрачное для инфракрасного излучения окно 6 (из фторида лития). Для определения поля температур $T(x, y)$ на свободной поверхности раствора проводилась тепловизионная съёмка со скоростью 10 кадр/с. Полученные значения поля температур корректировались с учетом специальных тарировочных данных. Для визуальных наблюдений в абсорбере были установлены оптические окна 7. Цифровая видеокамера Panasonic DMC-FZ8 4 использовалась для визуализации движений жидкости. Для визуализации течений проводилась видеосъёмка картин течения на поверхности и в приповерхностном слое жидкости со скоростью 30 кадр/с видеокамерой через верхнее или боковое смотровое окно. В качестве частиц-меток в раствор добавлялись частицы оксида железа размером $0,1 \div 10$ мкм. Выбор материала частиц был обусловлен условием отсутствия химического взаимодействия между частицами и водным раствором бромида лития. Размер частиц и их концентрация подбирались экспериментально при визуализации конвективного течения в слое раствора бромида лития, нагреваемого снизу. Измерение высоты жидкости в абсорбционной ячейке h проводилось катетометром В-630 5. Сбор информации и обработка результатов экспериментов проводились с использованием персонального компьютера и системы автоматизированного измерения показаний первичных датчиков.

Начальная концентрация водного раствора бромида лития ξ_0 для зависимости плотности жидкости $\rho(\xi, T)$ от концентрации ξ и температуры T определялась по табличным значениям Лёвера [17]. Плотность раствора измерялась с помощью ареометров АОН-1 с точностью ± 1 г/см³, температура раствора измерялась с точностью 0,1 °С ртутным термометром.

Рис. 2. Схема абсорбционной ячейки. 1 — вакуумная камера (абсорбер), 2 — кювета, 3 — IR-камера (тепловизор), 4 — цифровая видеокамера, 5 — катетометр, 6 — прозрачное окно для инфракрасного излучения, 7 — оптические смотровые окна, 8 — неподвижный слой водного раствора бромистого лития.



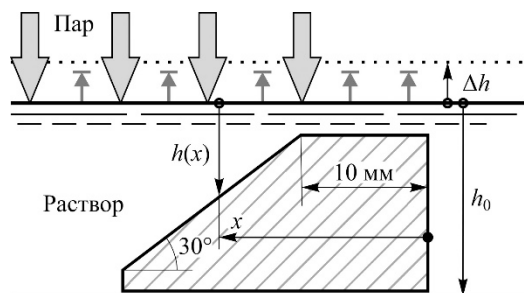


Рис. 3. Схема заполнения раствором ячейки с переменным рельефом дна.

Перед началом каждого эксперимента осуществлялись удаление неабсорбируемых газовых примесей и длительное (несколько часов) термостатирование раствора при комнатной температуре. Процесс абсорбции начинался с открытия клапана и подачи водяного пара из генератора в абсорбционную камеру. Давление P в камере измерялось низкопределным датчиком давления Метран-45 с частотой опроса 40 мс. При этом синхронно начиналась запись на видеокамеру движений частиц-меток в жидкости, а через ИР-стекло на инфракрасную камеру регистрировалось поле температур межфазной поверхности. Точность измерения температуры ИР камерой NEC-ТН7100 для длины регистрируемого теплового излучения $\lambda = 8 \div 12$ мкм составляла 0,3 градуса при чувствительности порядка 0,1 градуса. С помощью специализированной программы ТН71RX, рекомендованной производителем NEC, для каждого кадра термограммы размером 340 на 240 ячеек данные записывались в таблицу. Далее численные значения обрабатывались в соответствии с тарировочными данными, полученными для концентраций водного раствора бромида лития ξ от 0 до 60 % для диапазона температур T от 15 до 45 °С. В процессе абсорбции (поглощения водяного пара слоем раствора) высота раствора h в абсорбционной ячейке менялась. Изменение высоты жидкости измерялось катетометром с точностью 0,01 мм.

Эксперименты проводились с водным раствором бромида лития с начальной массовой концентрацией соли в растворе $\xi = 57,8$ % и с раствором, в который был добавлен ПАВ n -октанол концентрации $c = 25$ и 50 ppm. Для создания переменного рельефа дна в абсорбционную ячейку помещался брусок-призма из нержавеющей стали (рис. 3), верхняя горизонтальная поверхность которого имела следующие размеры: ширина 10 мм, длина 50 мм. В абсорбционную ячейку заливался раствор, высота слоя h_0 которого менялась так, чтобы над верхней горизонтальной гранью призмы слой жидкости составлял примерно 1,1–2 мм. Вдоль наклонной грани призмы глубина раствора $h(x)$ изменялась на 12 мм.

Экспериментальные результаты

В работе было проведено экспериментальное исследование влияния ПАВ и рельефа дна на формирование температурного режима на поверхности неподвижного слоя водного раствора бромида лития после подачи водяного пара с избыточным давлением в абсорбционную камеру.

Длительность переходного режима определялась скоростью нарастания давления пара в абсорбере после открытия клапана, соединяющего абсорбер с генератором пара. На рис. 4 приведена зависимость изменения давления P от времени t в абсорбционной камере. Символы здесь соответствуют измеренным значениям давления с точностью ± 6 Па, а линия — интерполяция измеренных значений указанной на рисунке функцией, где характерное время нарастания давления $\tau_1 = 0,16$ с. После подачи пара и до момента прекращения движения паровых потоков в камере над кюветой на поверхности раствора наблюдается локальная интенсивность абсорбции, которая существенно различается, вследствие чего наблюдается неоднородное поле температур поверхности.

От таких параметров как химическая чистота поверхности и высота слоя абсорбента, зависят длительность переходного режима и скорость роста слоя при абсорбции (рис. 5). Видно, что при временах порядка $1000 \cdot \tau_1 = 160$ с переменный рельеф дна не влияет

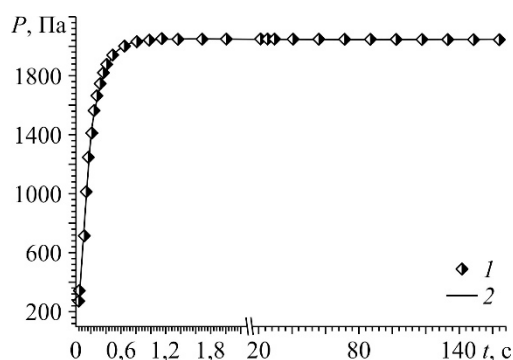


Рис. 4. Изменение во времени давления в абсорбере.

$$P_0 = 273 \text{ Па}, P_1 = 2037 \text{ Па}, \Delta P = 1764 \text{ Па};$$

1 — экспериментальные данные P , полученные с точностью ± 6 Па, 2 — интерполяция опытных данных функцией $P = P_0 + \Delta P \cdot \left(1 - e^{-\frac{t-0.03}{0.16}}\right)$, где 0,16 — характерное время нарастания давления ($\tau_1 = 0,16$).

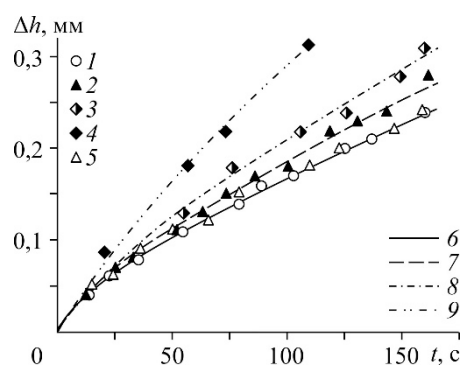


Рис. 5. Изменение толщины слоя Δh .

Символы 1–5 соответствуют экспериментальным точкам: кювета без ПАВ (1), раствор с ПАВ при $c = 25$ (2), 50 (3), 100 (4) ppm, 5 — раствор переменной глубины без ПАВ ($c = 0$ ppm); линии 6–9 — интерполяция по формуле $\Delta h = 6,2 \cdot 10^{-3} \cdot t^s$ при разных значениях степени s : $s = 0,718$ (6), 0,740 (7), 0,765 (8), 0,835 (9).

на скорость абсорбции. Чистота поверхности (наличие примесей в растворе в виде ПАВ различной концентрации) уже на этих временах ($1000\tau_1$) приводит к заметному различию в скорости роста слоя. Визуализация положения частиц оксида железа показала, что на поверхности раствора после подачи водяного пара в абсорбер возникают конвективные течения. Характер движения частиц указывает на присутствие конвективных течений в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Однако после установления давления в абсорбере в растворе без ПАВ движение частиц-меток в вертикальном направлении наблюдается только вблизи свободной поверхности и со временем его интенсивность значительно снижается, что свидетельствует о затухании конвективных течений. Для раствора с ПАВ после установления давления в абсорбере появление частиц-меток в поле кадра на различных расстояниях от свободной поверхности носит нерегулярный характер. Такое поведение частиц-меток можно объяснить, приняв предположение, что в объеме раствора и на поверхности существуют вихревые структуры различной интенсивности, существование которых способствует увеличению интенсивности абсорбции на поверхности раствора за счет более высокой скорости теплопередачи выделяемого тепла абсорбции с поверхности в объем жидкости.

На рис. 6 приведены характерные термограммы поверхности водного раствора бромида лития в различные моменты времени t после подачи пара в абсорбционную камеру с учетом характерных режимных параметров, таких как химическая чистота поверхности (раствор с ПАВ или без ПАВ) и переменная глубина слоя. На рис. 7 приведены результаты обработки этих термограмм в виде профилей температуры вдоль линии, проходящей через центр кюветы, для двух моментов времени: $t = 0,4$ с и $t = 160$ с. Расстояние r отсчитывалось от центра кюветы.

На рис. 6 видно, что после начала абсорбции наблюдается неоднородное распределение температуры на поверхности раствора (рис. 6а). Через 4 секунды происходит выравнивание температуры поверхности, а затем наблюдается монотонный рост высоты абсорбированного слоя жидкости. Это может свидетельствовать о том, что через $10 \cdot \tau_1 \div 20 \cdot \tau_1$ происходит равномерное распределение и поглощение пара раствором. Последнее связано главным образом с тем, что после подачи пара на межфазной поверхности неизбежно образуются локальные области с различной интенсивностью тепловыделения.

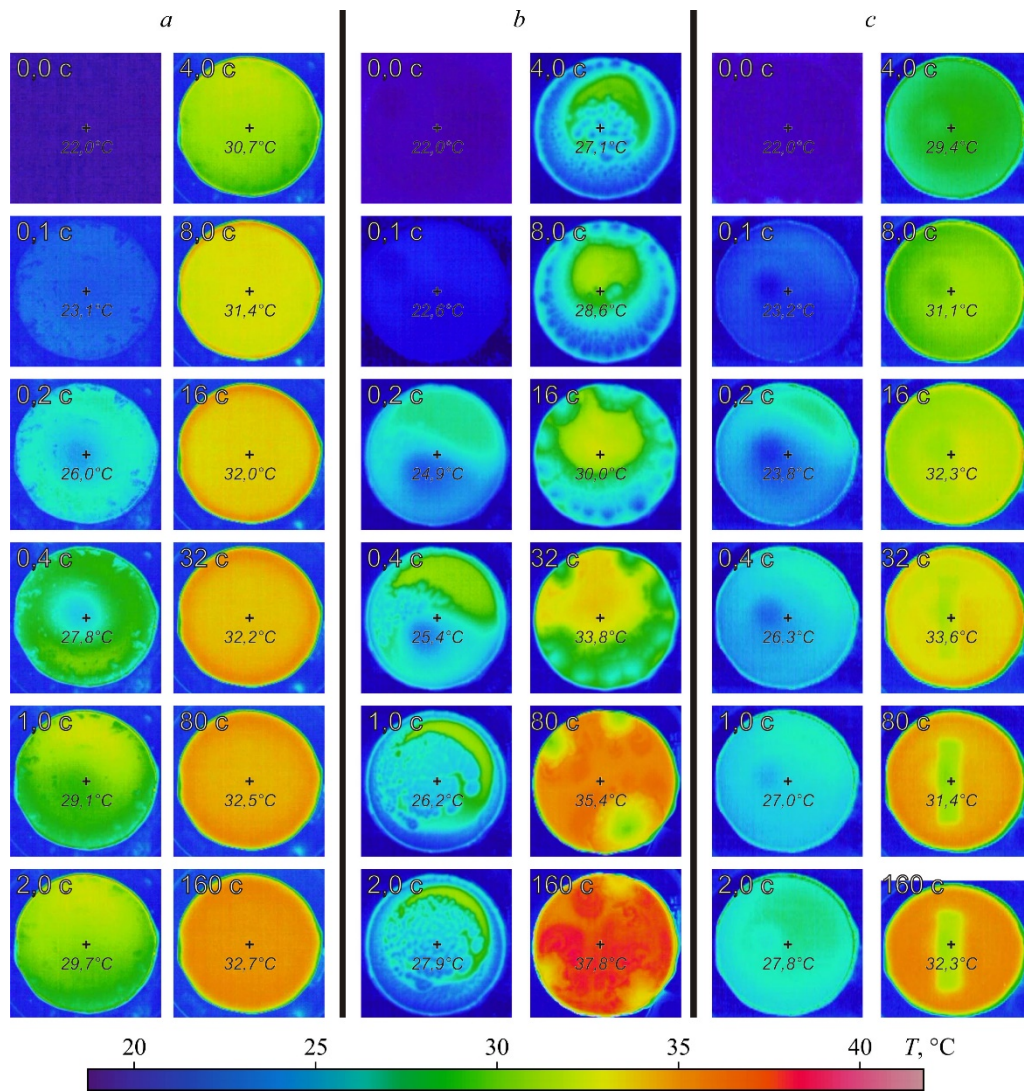


Рис. 6. Термограммы поверхности абсорбционной ячейки в различные моменты времени.

a — глубина слоя раствора в кювете $h_0 = 14$ мм, добавки ПАВ отсутствуют ($c = 0$ ppm);

b — глубина слоя раствора в кювете $h_0 = 14$ мм, концентрация ПАВ ($c = 25$ ppm);

c — глубина слоя раствора в кювете с призмой $h_0 = 14$ мм, добавки ПАВ отсутствуют ($c = 0$ ppm);

начальная температура раствора $T_0 = 22$ °С, начальная концентрация раствора $\xi_0 = 57,8$ %,

давление пара $P_1 = 2$ кПа.

Вследствие этого на границах данных областей появляется касательное напряжение, обусловленное зависимостью поверхностного натяжения от температуры, что и приводит к конвективному движению жидкости. При добавлении в раствор ПАВ на поверхности наблюдается совсем другая картина (рис. 6*b*). В отличие от случая, показанного на рис. 6*a*, возникшие в первые моменты после начала абсорбции температурные неоднородности на поверхности не выравниваются, а развиваются и принимают на ней различные формы. При этом за счет возникшего движения на поверхности происходит интенсификация процесса абсорбции, локальные температуры на поверхности становятся заметно выше: 32,7 °С — для случая, показанного на рис. 6*a*, и 37,8 °С — для случая на рис. 6*b*.

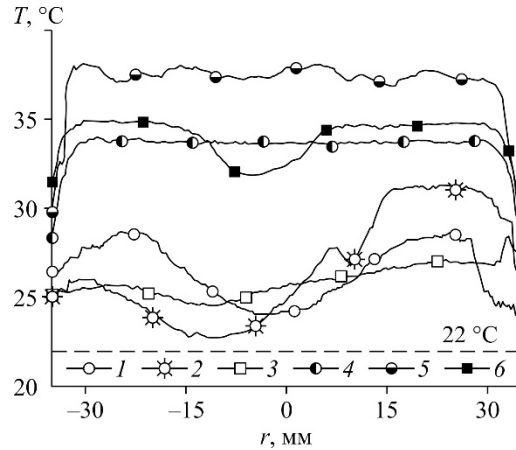
Рис. 7. Профиль температуры на поверхности раствора вдоль линии, проходящей через центр кюветы.

$t = 0,4$ с: a (1), b (2), c (3),

$t = 160$ с: a (4), b (5), c (6);

режимные параметры,

соответствующие a, b, c (см. рис. 6).



Наличие неоднородностей на дне ячейки в виде выступов также влияет на температуру поверхности при абсорбции (рис. 6с). При этом следует отметить, что в первые несколько секунд поле температур $T(x, y)$ аналогично изображенному на рис. 6а. Начиная с 8-й секунды происходит формирование фиксированной на поверхности раствора зоны температурной неоднородности, имеющей прямоугольную форму, центральная линия которой соответствует положению ребра между верхней горизонтальной гранью и наклонной гранью призмы.

Следует отметить, что при абсорбции нет особых и видимых условий для развития неустойчивых состояний и, соответственно, возникновения локальных температурных неоднородностей на поверхности абсорбирующего раствора. При абсорбции высота слоя жидкости h увеличивается, при этом концентрация соли ξ уменьшается и увеличивается температура T за счет выделения тепла абсорбции q . Как следствие, плотность ρ уменьшается при приближении к поверхности, что не способствует развитию конвективных течений. Со временем на поверхности уменьшаются теплота растворения q , вязкость η , поверхностное натяжение σ , и это способствует затуханию конвективных течений и уменьшению разброса локальных значений температуры. На рис. 8 приведены безразмерные параметры $\bar{\rho}$, $\bar{\sigma}$, $\bar{\eta}$, \bar{q} для водного раствора бромистого лития в зависимости от температуры T и массовой концентрацией соли ξ :

$\bar{\rho} = \frac{\rho(T, x)}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}(T = 20^\circ\text{C})}$ — плотность раствора,

$\bar{\sigma} = \frac{\sigma(T, x)}{\sigma_{\text{H}_2\text{O}}(T = 20^\circ\text{C})}$ — коэффициент поверхностного натяжения, $\bar{\eta} = \frac{\eta(T, x)}{\eta_{\text{H}_2\text{O}}(T = 20^\circ\text{C})}$ —

динамическая вязкость раствора, $\bar{q} = \frac{q_{\text{H}_2\text{O}}(T, x)}{q_{\text{H}_2\text{O}}(T = 40^\circ\text{C}, \xi = 0,643)}$ — удельная теплота

растворения воды в растворе (предельная растворимость LiBr в воде $\xi = 64,3\%$ при $T = 40^\circ\text{C}$).

Добавление в раствор небольшого количества ПАВ сказывается в основном на изменении поверхностного натяжения σ , которое зависит от концентрации ПАВ c . На рис. 8б показана зависимость σ от концентрации ПАВ c и температуры T для $\xi = 0,5$ [18].

Для численной оценки величины локальной температурной неоднородности для области Ω в настоящей работе используется параметр Θ , имеющий размерность температуры:

$$\Theta = \left(T_{\max}|_{\{x,y \in \Omega\}} - T_{\min}|_{\{x,y \in \Omega\}} \right),$$

где T_{\max} и T_{\min} — соответственно максимальная и минимальная температуры для выбранной локальной области Ω . На рис. 9 представлены данные по изменению во времени параметра температурной неоднородности Θ для всей поверхности раствора абсорбента

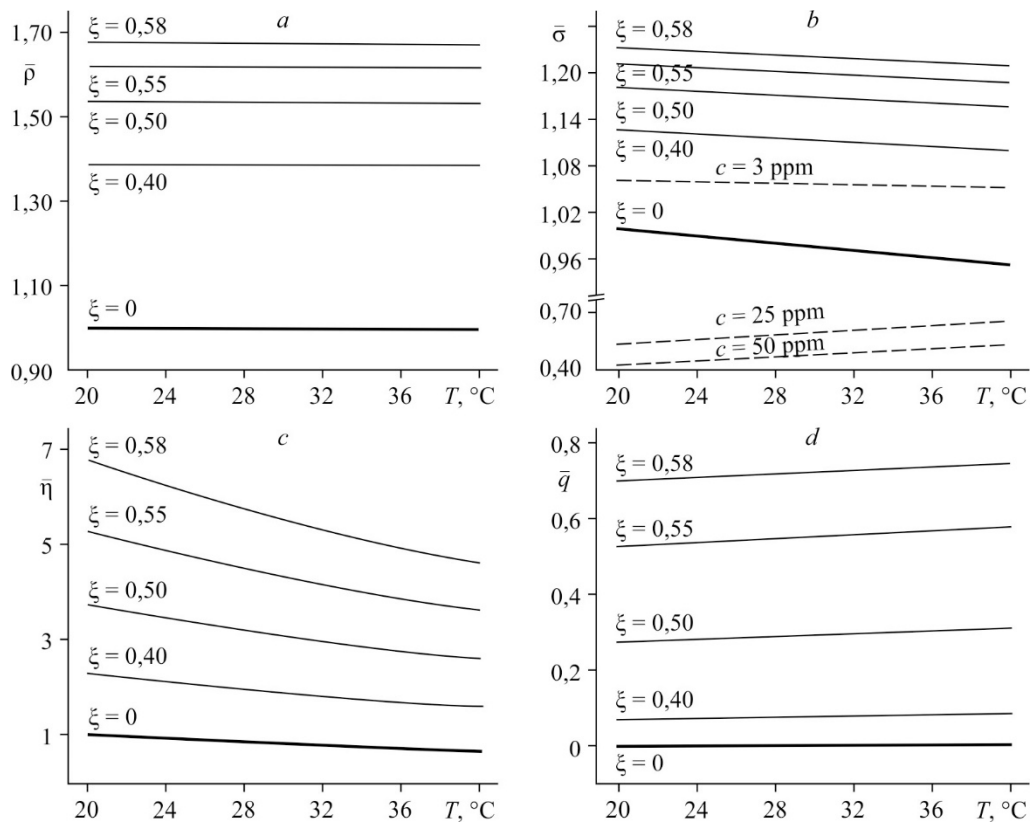


Рис. 8. Изменение теплофизических свойств водного раствора LiBr в зависимости от температуры T и концентрации ξ .

в абсорбционной ячейке за исключением участков вблизи стенки кюветы, где имеет место влияние стенок кюветы на инфракрасное излучение, поступающее в тепловизор.

Сравнивая картины поля температур на термограммах, представленных на рис. 6, с данными рис. 9, можно видеть, что в чистом растворе ($c = 0$ ppm) с равномерной глубиной заполнения и в кювете с переменным рельефом дна существует область с локальной температурной аномалией в виде пятна, которой соответствует величина параметра Θ порядка 4°C . При этом значение параметра Θ , определенное по всей поверхности, равно значению, определенному по области пятна. Аномалия возникла во время установления давления в камере и держалась в течение двух секунд, затем исчезла, так как величина температурных неоднородностей снизилась ниже уровня точности измерения используемой тепловизионной техники. Аналогично случай раствора с $c = 25$ ppm и равномерной глубиной заполнения значение параметра Θ имеет величину порядка 7°C во время установления постоянного давления в абсорбере, а после его установления в камере наблюдается уменьшение значений параметра Θ . Однако когда $c \geq 25$ ppm, области температурных аномалий не исчезают (рис. 6b), так как проявляется влияние эффектов, связанных с термокапиллярной конвекцией Марангони. Существующие градиенты температур вначале приводят к возникновению области крупномасштабной температурной аномалии на поверхности в виде пятна, температура которого в центре на 8°C превышает температуру на его периметре. Образовавшаяся структура не обладает высокой степенью устойчивости и со временем распадается на несколько устойчивых вихревых зон

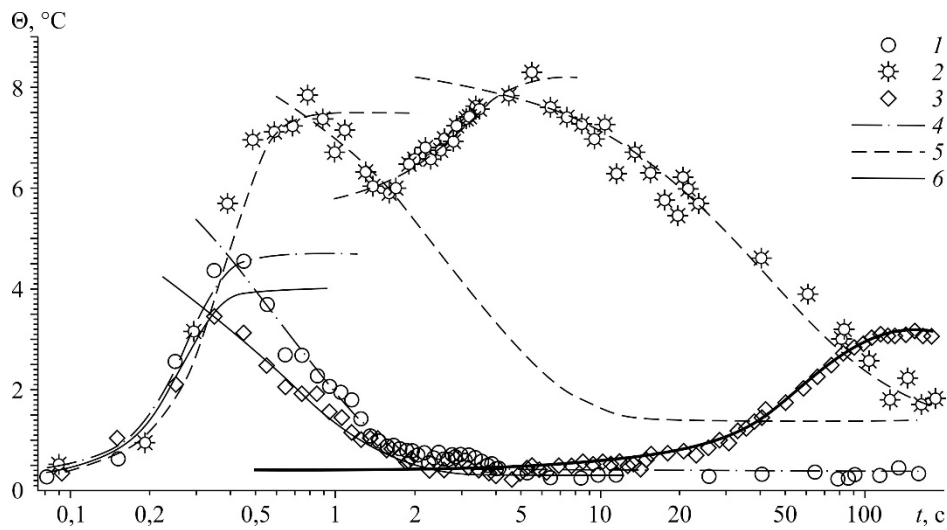


Рис. 9. Изменение во времени параметра температурной неоднородности Θ для различных условий.

1 — чистый раствор ($c = 0$ ppm), 2 — раствор с $c = 25$ ppm,
3 — кювета с переменным рельефом дна ($c = 0$ ppm);
линии 4–6 — интерполяция опытных данных функцией $f(t)$
(типы функции $f(t)$ описаны формулами (1) и (2)).

небольшого размера. Центры этих зон расположены около стенок кюветы и совершают медленное вращение относительно центра кюветы. Такое движение способствует перемешиванию жидкости в поверхностном слое абсорбирующего раствора, что приводит к уменьшению значений параметра Θ до уровня порядка $1,5$ °C.

Для чистого раствора ($c = 0$ ppm) в абсорбционной ячейке с переменным рельефом дна из-за различных условий прогрева слоя жидкости с течением времени на поверхности тоже появляется локализованная в пространстве температурная аномалия. На рис. 10 показано как изменяется профиль температуры в этой области со временем вдоль линии, проходящей через центр кюветы и перпендикулярно к длинному ребру призмы, для различных моментов времени t . Также на рисунке показано, как профиль температуры соотносится с распределением высоты раствора h в кювете (темная область соответствует начальному распределению уровня, а линия выше показывает изменение уровня к моменту времени, равному 160 с). Видно, что к моменту времени 4,65 с температура поверхности становится более или менее однородной, но после 7-й секунды равномерное распределение температуры на поверхности нарушается. Видимо, это как-то связано с влиянием рельефа дна на теплообмен при абсорбции. Однако на фоне роста средней температуры поверхности раствора до моментов времени $20 \div 30$ секунд эта зона с особенностью температурного профиля не очень заметна. Следует отметить, что к 20-й секунде температура на глубине 2 мм достигает своего максимума. Таким образом, можно предполагать, что в пределах этой зоны до глубины порядка 2 мм, имеет место линейная зависимость температуры по высоте слоя. Далее на поверхности наблюдается снижение температуры в области, где глубина слоя составляет 2 мм на расстоянии ≈ 3 мм от точки перегиба рельефа (на графике слева), здесь глубина слоя начинает монотонно увеличиваться, и на расстоянии ≈ 1 мм от точки перегиба рельефа в сторону, где глубина слоя растет (на графике справа). На расстоянии порядка 12 мм вправо и влево от этой зоны температура на поверхности раствора монотонно повышается на 3 °C, а затем достигает максимального значения и остается постоянной вдоль линии. Здесь необходимо

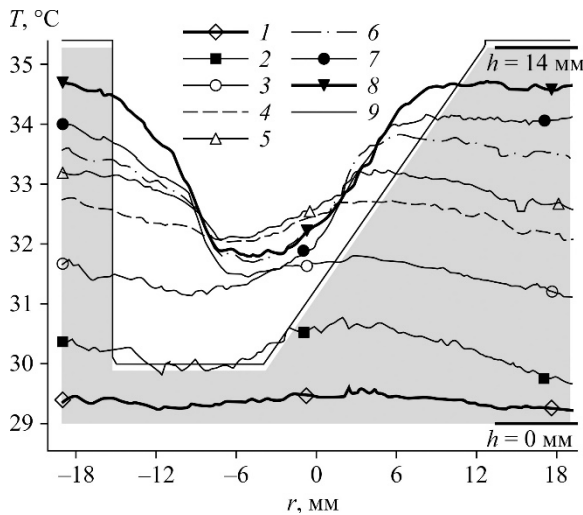


Рис. 10. Изменение профиля температуры T на поверхности раствора вдоль линии, проходящей через центр кюветы и перпендикулярно длинному ребру призмы, для различных моментов времени t . Кювета с призмой, $h_0 = 14$ мм, $c = 0$ ppm, $T_0 = 22$ °C, $\xi_0 = 57,8$ %, $P_1 = 2$ кПа; $t = 4,65$ (1), 6,95 (2), 10,15 (3), 20,45 (4), 30,45 (5), 57,95 (6), 89,95 (7), 176,9 (8), 9 — глубина слоя h в момент времени 160 с.

наклонной гранью наблюдается переход, повторяющий наклонный рельеф дна, от постоянного по радиусу кюветы значения температуры поверхности к увеличению значения температуры поверхности над призмой.

Оценка характерных времен при переходном процессе

Для оценки величины характерного времени τ изменения параметра Θ экспериментальные данные для величины Θ в различные моменты времени t сравнивались с эмпирической зависимостью $f(t)$, имеющий вид:

$$f(t) = G_i + (G_j - G_i) \cdot \left\{ \left[1 + \operatorname{th} \left(\frac{t - t_*}{\tau} \right) \right] / 2 \right\} \quad (1)$$

или

$$f(t) = G_i + (G_j - G_i) \cdot \exp \left(- \frac{t - t_*}{\tau} \right), \quad (2)$$

в которой определяющим параметром является τ . На рис. 9 показано сравнение Θ с $f(t)$ при абсорбции водяного пара 57,8 % водным раствором бромистого лития для трех случаев: 1 — чистый раствор ($c = 0$ ppm), 2 — раствор с $c = 25$ ppm и 3 — кювета с переменным рельефом дна и $c = 0$ ppm. Тип зависимости $f(t)$ и значения параметров для различных интервалов времени после подачи пара и начала абсорбции приведены в таблице.

Таблица

Параметры функции $f(t)$ для рис. 9

Опытные данные с рис. 9	Интервал t , с	τ , с	Тип функции $f(t)$	G_i , °C	G_j , °C	t_* , с
1	0,0 ÷ 0,5	0,12	(1)	0,20	4,70	0,25
	0,4 ÷ 160	0,60	(2)	0,40	5,00	0,35
2	0,0 ÷ 1,1	0,18	(1)	0,00	7,50	0,35
	0,8 ÷ 2	2,90	(2)	1,40	7,60	0,70
	1 ÷ 6	1,80	(1)	5,30	8,20	2,40
	4 ÷ 160	45,0	(2)	1,60	7,00	11,0
3	0,0 ÷ 0,4	0,11	(1)	0,20	4,00	0,24
	0,3 ÷ 4	0,60	(2)	0,30	1,80	0,80
	2,5 ÷ 160	42,0	(1)	0,10	3,20	46,0

Проведем сопоставление значений τ , приведенных в таблице, с условиями на поверхности. Характерное время τ в момент установления давления соответствует характерному времени $\tau_1 = 0,16$ с для роста давления (значения $\tau = 0,12, 0,18, 0,11$ с из таблицы близки к значению $0,16$ с). Для следующего этапа, когда наблюдается уменьшение амплитуды локальных температурных неоднородностей, характерное время τ зависит от чистоты поверхности и составляет $\tau = 0,6$ с для чистого раствора ($c = 0$ ppm) и $\tau = 2,9$ с — для раствора, где $c = 25$ ppm.

Довольно быстро растут возмущения при возникновении крупномасштабной температурной неоднородности на поверхности раствора в присутствии ПАВ ($\tau = 1,8$ с). Затухания возмущений от такой температурной аномалии идут значительно дольше ($\tau = 45$ с), но скорость затухания согласуется со скоростью дрейфа вихревых зон с повышенной температурой поверхности вдоль стенки кюветы: ~ 30 мм за 50 с. Соответственно, на перемещение возмущений от вихря до центра кюветы требуется время ~ 50 с. Характерное время $\tau = 42$ с для установления температурной аномалии в зоне изменения высоты слоя или рельефа дна соизмеримо с величиной времени, необходимого для проникновения температурного возмущения на глубину h , которое можно оценить как $\tau = h^2/a$, где a — коэффициент температуропроводности жидкости. При $a = 1,34 \cdot 10^{-7}$ м²/с для 58 % раствора бромида лития значения τ составляют при $h = 2$ мм — $\tau = 29,8$ с и при $h = 2,4$ мм — $\tau = 42,9$ с, что соответствует изменению глубины слоя с 2 до 2,3 мм ($\tau = 42$ с).

Заключение

В работе показано, что на этапе увеличения давления паров воды над свободной поверхностью неподвижного слоя водного раствора бромида лития выше значений давления насыщения интенсивность тепловыделения при абсорбции неодинакова на различных участках межфазной поверхности. Вследствие этого на поверхности формируется неоднородное поле температуры и развивается термокапиллярная конвекция в объёме и в приповерхностном слое жидкости. Сопоставление данных по величине температурных неоднородностей Θ с данными по изменению давления P в камере абсорбера показывает, что зависимость Θ от времени коррелирует с зависимостью P от времени. После прекращения движения паровых потоков и установления постоянного давления в абсорбере происходит затухание конвективных течений, на поверхности устанавливается однородное поле температур. Ослабление термокапиллярной конвекции вызвано тем, что плотность раствора ρ уменьшается при приближении к поверхности, так как при абсорбции высота слоя жидкости h увеличивается, при этом уменьшается концентрация соли ξ в приповерхностном слое и увеличивается температура T за счет выделения тепла абсорбции q . Уменьшение величины температурных неоднородностей Θ со временем происходит по экспоненциальной зависимости, параметры которой определяются значением максимального уровня Θ во время этапа установления давления в абсорбере и концентрацией ПАВ.

В неподвижном слое водного раствора LiBr с ПАВ полного затухания конвективных течений не происходит. Из-за наличия в растворе ПАВ и присутствия на поверхности областей с градиентом температур происходит развитие конвекции Марангони. Для абсорбционной ячейки диаметром 70 мм процесс происходил в два этапа: вначале формировалась крупномасштабная зона с относительно однородным распределением температуры в центре, затем эта зона делилась на несколько небольших вихревых структур, центры которых дрейфовали по поверхности. Существование вихревых структур способствует перемешиванию жидкости в приповерхностном слое и, как следствие,

уменьшению размеров областей с различными значениями температуры и снижению параметра Θ до уровня порядка 2°C . Время выхода на этот режим определяется скоростью дрейфа вихревых структур.

Для абсорбционной ячейки с переменным рельефом дна из-за различия времени выхода на линейный профиль температуры по высоте слоя жидкости для участков с различной глубиной образуются локализованные на межфазной поверхности зоны с неоднородным полем температур внутри. Однако размеры, форма такой зоны и профиль температуры в ней только частично коррелируют с особенностями рельефа дна ячейки. Время, когда начинается формирование зоны, определяется участком рельефа, где высота слоя жидкости минимальна.

Список обозначений

a — температуропроводность жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$,	q — удельная теплота растворения воды
c — концентрация ПАВ, ppm ,	в растворе, $\text{Дж}/\text{кг}$,
$f(t)$ — эмпирическая функция от времени,	t — время от момента подачи пара, с ,
G — размерный параметр для функции $f(t)$, $^\circ\text{C}$,	t_* — время отсчета для эмпирической функции $f(t)$, с ,
h — высота слоя жидкости, м ,	T — температура, $^\circ\text{C}$,
P — давление, Па ,	x, y — координаты на поверхности, м .
r — расстояние от центра кюветы, м ,	

Греческие символы

ΔP — перепад давления, Па ,	ξ — весовая концентрация LiBr в растворе, $\text{кг}/\text{кг}$
η — динамическая вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$,	или $\%$,
Θ — параметр неоднородности температурного поля, $^\circ\text{C}$,	ρ — плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$,
λ — длина регистрируемого тепловизором теплового излучения, мкм ,	σ — коэффициент поверхностного натяжения, $\text{Н}/\text{м}$,
	τ — характерное время, с ,
	Ω — локальная область.

Безразмерные параметры

\bar{q} — удельная теплота растворения воды в растворе,	$\bar{\sigma}$ — поверхностное натяжение,
s — показатель степени,	$\bar{\rho}$ — плотность.
$\bar{\eta}$ — динамическая вязкость,	

Индексы

0 — начальное значение,	\max и \min — максимальное и минимальное значения
1 — этап установления давления в абсорбере,	в локальной области Ω .
i, j — индексы для параметра G ,	

Список литературы

1. Накоряков В.Е., Григорьева Н.И. Точное решение задачи о совместном тепломассопереносе при пленочной абсорбции // Инж.-физический журнал. 1977. Т. 33, № 5. С. 893–896.
2. Grossman G. Simultaneous heat and mass transfer in film absorption under laminar flow // Int. J. Heat Mass Transfer. 1983. Vol. 26, No. 3. P. 357–371.
3. Накоряков В.Е., Григорьева Н.И. Тепломассообмен при пленочной абсорбции с изменением объема жидкой фазы // Теоретические основы химической технологии. 1995. Т. 29, № 3. С. 242–248.
4. Daiguji H., Hihara E., Saito T. Mechanism of absorption enhancement by surfactant // Int. J. Heat Mass Transfer. 1997. Vol. 40, No. 8. P. 1743–1752.
5. Накоряков В.Е., Буфетов Н.С., Дехтярь Р.А. Экспериментальное исследование влияния малых добавок ПАВ на неизотермическую абсорбцию // Прикл. мех. и технич. физика. МТФ. 2004. Т. 45, № 2. С. 156–161.
6. Nakoryakov V.E., Grigoryeva N.I., Bufetov N.S., Dekhtyar R.A. Heat and mass transfer intensification at stream absorption by surfactant additives // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2008. Vol. 51, No. 21–22. P. 5175–5181.
7. Накоряков В.Е., Буфетов Н.С., Дехтярь Р.А. Тепломассоперенос при абсорбции пара неподвижным слоем раствора // Прикл. мех. и технич. физика. 2003. Т. 44, № 2. С. 101–108.

8. Nakoryakov V.E., Grigoryeva N.I., Bufetov N.S., Dekhtyar R.A., Marchuk I.V. Vapor absorption by immobile solution layer // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2004. Vol. 47, No. 6–7. P. 1525–1533.
9. Misyura S.Y. Evaporation and heat transfer of a sessile drop of aqueous salt solution on heated wall // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 116. P. 667–674.
10. Misyura S.Y. Evaporation of a sessile water drop and a drop of aqueous salt solution // Scientific Reports. 2017. Vol. 7, No. 1. Art. 14759.
11. Степанов К.И., Мухин Д.Г., Алексеенко С.В., Волкова О.В. Экспериментальное исследование получения отрицательных температур в абсорбционных бромистолитиевых холодильных машинах // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 4. С. 501–510.
12. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М: Госуд. изд-во физ.-мат. литературы, 1959. 699 с.
13. Накоряков В.Е., Григорьева Н.И., Буфетов Н.С., Дехтярь Р.А. Тепломассобмен при паровой абсорбции на ряде горизонтальных труб // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сборник научных статей. Киев: «НПВК Триакон», 2011. Вып. 2. С. 86–90.
14. Mortazavi M., Isfahani R.N., Bigham S., Moghaddam S. Absorption characteristics of falling film LiBr (lithium bromide) solution over a finned structure // Energy. 2015. Vol. 87. P. 270–278.
15. Yu D., Chung J., Moghaddam S. Parametric study of water vapor absorption into a constrained thin film of lithium bromide solution // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2012. Vol. 55. P. 5687–5695.
16. Буфетов Н.С., Дехтярь Р.А., Овчинников В.В. Экспериментальное исследование термокапиллярной конвекции в растворе бромида лития при неизотермической абсорбции // Вестник Мурман. гос. технич. ун-та. 2016. Т. 19, № 3. С. 673–679.
17. Löwer H. Thermodynamische und physikalische Eigenschaften der wässrigen Lithiumbromid-Lösung // PhD Thesis. Technischen Hochschule Karlsruhe. 1960. 97 p.
18. Yao W., Bjurstroem H., Setterwall F. Surface tension of lithium bromide solutions with heat-transfer additives // J. Chem. Eng. Data. 1991. Т. 36. P. 96–98.

*Статья поступила в редакцию 12 мая 2020 г.,
после переработки — 19 июля 2020 г.,
принята к публикации 5 августа 2020 г.*