

УДК 629.76

## **Исследование процесса испарения жидкости со свободной поверхностью в замкнутой ёмкости при понижении давления и акустическом воздействии\***

**В.И. Трушляков<sup>1</sup>, А.А. Новиков<sup>1</sup>, И.Ю. Лесняк<sup>1</sup>, А.В. Паничкин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Омский государственный технический университет*

<sup>2</sup>*Омский филиал Института математики им. С.Л. Соболева СО РАН*

E-mail: lesnyak.ivan@gmail.com, panich@ofim.oscsbras.ru,

Проведены теоретико-экспериментальные исследования процесса испарения жидкости со свободной поверхностью в замкнутой ёмкости при вакуумном и акустическом воздействиях. Разработана математическая модель влияния акустического воздействия и давления газа в замкнутой ёмкости на температуру и скорость испарения жидкости. Разработана программа и методика проведения экспериментов, создан экспериментальный стенд, реализована программа экспериментов. При проведении экспериментов использовался пьезокерамический излучатель с постоянными во времени значениями частоты и амплитуды колебаний. В качестве жидкости рассматривалась дистиллированная вода. В работе приведены экспериментальные зависимости изменения температуры жидкости и расчетные значения скорости испарения жидкости как при совместном вакуумном и акустическом воздействиях, так и при воздействии этих факторов по отдельности. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных значений температур жидкости в процессе испарения показал совпадение с точностью до 10 %. Авторами проведен регрессионный анализ влияния на скорость испарения жидкости таких факторов, как давление в вакуумной камере и мощность акустического воздействия. Получено уравнение регрессии, позволяющее оценить влияние акустического и вакуумного воздействий на скорость испарения жидкости в процессе эксперимента при различных давлениях и массах жидкости. Сформулированы предложения для проведения дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** тепло- и массообмен, акустическое и вакуумное воздействия, парогазовая смесь, математическая модель, эксперимент, уравнение регрессии.

### **Введение**

В настоящее время задача исследования влияния акустических колебаний и давления парогазовой среды на процессы тепло- и массообмена, происходящие в замкнутой ёмкости при испарении жидкостей, является актуальной. Существуют различные способы испарения жидкостей, в том числе путем непосредственного нагрева поверхности, на которой располагается жидкость, конвективным воздействием на жидкость потоком газа, а также акустическим и вакуумным воздействиями (АВ, ВВ) и др.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования по сушке различных материалов, испарению жидкости [1], в том числе при АВ, подтверждают тот факт,

---

\* Исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках гос. задания подведомственным образовательным организациям, проект «Повышение экологической безопасности и экономической эффективности ракет-носителей с маршевыми жидкостными ракетными двигателями», задание № 9.1023.2017/ПЧ.

что скорость протекания процесса зависит от частоты и давления АВ. Например, в работе [2] при испарении нафталина с поверхности металлических шариков диаметром 3–6 мм была получена линейная зависимость потока массы от параметров АВ. Исследования, проведенные при различных граничных и краевых условиях, разных механизмах подачи теплоты (конвективный, кондуктивный), акустическом воздействии, показали (см., например, [3–16]), что существующие научно-методические подходы к исследованию процессов испарения жидкости находятся в стадии интенсивной разработки. С другой стороны, широкое использование сушки во многих сферах человеческой деятельности (сельское хозяйство, фармацевтика, промышленное производство и т.д.) приводит к необходимости поиска более эффективных методов.

В настоящих экспериментальных и теоретических исследованиях рассматриваются процессы тепло- и массообмена при испарении жидкости со свободной поверхностью в замкнутой ёмкости как при совместном АВ и ВВ, так и при воздействии этих факторов по отдельности.

### **1. Постановка задачи исследований**

Исследование процесса испарения жидкости со свободной поверхностью в замкнутой ёмкости при АВ и ВВ предлагается провести в ограниченном диапазоне параметров испаряемой жидкости и АВ с целью получения регрессионного уравнения, позволяющего оценить воздействие каждого фактора на скорость испарения жидкости.

Решение поставленной задачи предусматривает выполнение следующих шагов:

- разработка математической модели влияния АВ и давления парогазовой смеси (испарившаяся жидкость + газ в ёмкости) в замкнутой ёмкости на процесс испарения жидкости и проведение численных экспериментов;
- разработка программы и методики проведения экспериментов, формирование требований к экспериментальному стенду и его разработка;
- проведение экспериментов и сравнительного анализа результатов математического и физического моделирования;
- проведение регрессионного анализа и получение уравнения регрессии для аналитической оценки влияния на скорость испарения жидкости исследуемых параметров (мощности АВ, давления в замкнутой ёмкости).

Допущения и ограничения, принятые в настоящем исследовании:

- в качестве жидкости используется дистиллированная вода;
- начальная масса жидкости составляет 150 г при начальной температуре жидкости 14–16 °С;
- испарение жидкости рассматривается до точки ее замерзания;
- предполагается изменение давления в вакуумной камере (ВК) от 101 до 0,53 кПа с постоянной скоростью откачки 6,5 дм<sup>3</sup>/с с возможностью поддержания фиксированного давления.

### **2. Математическая модель влияния акустического воздействия и давления парогазовой смеси на процесс испарения жидкости**

Основными энергопотребляющими процессами при АВ на жидкую среду являются кавитация, микропотоки жидкости, вихревые течения. Эти процессы проявляются в виде нагрева жидкой среды, с одной стороны, за счет разогрева парогазовой смеси в кавитирующих пузырьках, а с другой — за счет рассеивания акустической энергии на неоднородностях различных слоев среды (жидкость, кавитационные пузырьки), формирующихся при возникновении кавитации и перемешивании жидкости.

Общая энергетика процесса определяется уровнем потребляемой энергии и в простейшем случае при использовании в качестве испытательного стенда ультразвуковой

ванны небольшого объема достаточно легко вычисляется после измерения напряжения, питающего генератор ванны, и потребляемого при этом тока. Затем учитывается КПД ультразвукового генератора и коэффициент электроакустического преобразования излучателя. В итоге остается определить величину акустической энергии, отдаваемой в жидкую среду, наполняющую ванну. При некоторых допущениях можно принять, что основные затраты акустической энергии приходятся на нагрев и перемешивание жидкости.

Для моделирования процесса перемешивания будем рассматривать наиболее подходящий для этого случая вариант: турбулентное течение и тело, движущееся в потоке. При использовании ультразвуковой ванны колебания дна ванны, создающие эффект движения плоскости в турбулентном потоке, позволяют оценить мощность, затрачиваемую для создания этого потока. В соответствие с формулой [17] мощность  $P$ , необходимую при движении тела в турбулентном потоке, можно представить в виде

$$P = c_r S \rho / 2v^3, \quad (1)$$

где  $c_r$  — коэффициент, зависящий от формы тела и являющийся функцией числа Рейнольдса,  $S$  — площадь плоскости в потоке, перпендикулярной его направлению,  $\rho$  — плотность жидкости,  $v$  — относительная скорость движения плоскости в среде или среды по отношению к плоскости. Эта скорость складывается из двух составляющих: скорости  $v_m$ , которая связана с колебаниями дна ванны при АВ и определяется следующим образом:

$$v_m = 2\pi f A_m, \quad (2)$$

где  $f$  — частота АВ,  $A_m$  — амплитуда колебаний; скорости  $v_k$ , которая определяется процессом кавитации и предельной скоростью течения вблизи кавитирующего пузырька, и оценивается следующим выражением [2]

$$v_k = U_s^2 / 2\pi f R, \quad (3)$$

где  $U_s$  — радиальная скорость границы пузырька,  $R$  — средний радиус кавитационного пузырька. Выражение (3) связано с несимметрией процессов расширения и сжатия кавитирующего пузырька [3], значение  $U_s$  также определяется средним радиусом пузырька и временем снижения давления среды, что при указанной выше несимметрии, составляет около 0,75 периода колебаний:

$$U_s = R / 0,5T = fR / 0,75, \quad (4)$$

где  $T$  — период колебаний. Таким образом, можно записать:

$$v_k = 8fR / 9\pi. \quad (5)$$

В свою очередь, резонансный размер пузырька может быть определен из формулы Миннерта [4], связывающей искомый размер с резонансной частотой колебаний:

$$f = 1 / 2\pi R \sqrt{3\gamma / \rho(P_0 + 2\sigma / R)}, \quad (6)$$

где  $R$  — средний радиус кавитационного пузырька,  $\gamma$  — показатель адиабаты воздуха,  $\sigma$  — поверхностное натяжение жидкости,  $P_0$  и  $\rho$  — статическое давление и плотность жидкости соответственно. Для упрощения дальнейших преобразований исключим в формуле (6) второй член в скобках, как величину второго порядка малости по сравнению со статическим давлением жидкости. Тогда выражение для размера пузырька будет иметь вид

$$R = 1 / 2\pi f \sqrt{3P_0\gamma / \rho}. \quad (7)$$

Выражение (3) с учетом (7) запишется как

$$v_k = 4/4\pi^2 \sqrt{3P_0\gamma/\rho}. \quad (8)$$

Соответственно, полная относительная скорость среды составит

$$v = v_m + v_k = 2\pi f A_m + 1/\pi^2 \sqrt{3P_0\gamma/\rho}. \quad (9)$$

Теперь можно оценить мощность  $P$ , затрачиваемую на создание турбулентного потока:

$$P = c_r S \rho / 2 \left( 2\pi f A_m + 1/\pi^2 \sqrt{3P_0\gamma/\rho} \right)^3. \quad (10)$$

Зная мощность, затрачиваемую на перемешивание и общую акустическую мощность, вводимую в технологическую среду, несложно определить ту часть мощности ( $P_T$ ), которая определяет нагрев среды:

$$P_T = S_a \rho c_c 2\pi^2 f^2 A_m^2 - c_r S \rho / 2 \left( 2\pi f A_m + 1/\pi^2 \sqrt{3P_0\gamma/\rho} \right)^3, \quad (11)$$

где  $S_a$  — площадь поверхности излучателя,  $c_c$  — скорость звука в воде. Из полученного выражения легко оценить изменение температуры среды:

$$\Delta T = P_T t / (m_l c_l + m_b c_b), \quad (12)$$

где  $t$  — время,  $m_l$  — масса жидкости,  $c_l$  — удельная теплоемкость жидкости,  $m_b$  — масса ванны,  $c_b$  — удельная теплоемкость материала ванны.

С другой стороны, процесс нагревания сопровождается испарением жидкости, особенно в условиях пониженного давления. При этом в соответствии с законами термодинамики процесс испарения сопровождается поглощением энергии, величина которой может быть определена через удельную теплоту парообразования:

$$Q = qm, \quad (13)$$

где  $q$  — удельная теплота парообразования,  $m$  — масса испарившегося вещества (в рассматриваемом случае — жидкости). Этот процесс также вносит коррективы в изменение температуры среды, только в обратную по отношению к нагреву сторону, тогда

$$\Delta T = (P_T t - qm) / (m_l c_l + m_b c_b). \quad (14)$$

Наконец, масса испарившегося вещества (жидкости) не образуется одномоментно, это временной процесс, который может быть описан в данном случае выражением (в соответствии с законом Дальтона):

$$\dot{m} = c S_s (p_n - p) / p_0, \quad (15)$$

где  $\dot{m}$  — количество жидкости, переходящей в пар в одну секунду,  $c$  — коэффициент массоотдачи (в дальнейшем определяемый экспериментально в предположении о его постоянстве в течение всего процесса испарения),  $S_s$  — площадь поверхности испарения,  $p_n$  — давление насыщенных паров жидкости,  $p$  — давление паров жидкости над ее свободной поверхностью,  $p_0$  — внешнее барометрическое давление. Поскольку соотношение между  $p$  и  $p_n$  представляет собой относительную влажность  $\varphi$ , то выражение для скорости испарения будет выглядеть как

$$\dot{m} = c S_s p_n (1 - \varphi) / p_0. \quad (16)$$

Более того, как уже отмечалось выше, процесс испарения — это временной процесс, и все параметры, определяющие скорость испарения и изменяющиеся во времени, необходимо

учитывать при расчетах. Поскольку эксперименты проводятся в ВК в условиях изменяющегося во времени давления, то выражение для массы жидкости, переходящей в пар, будет определяться следующим образом:

$$m = \int_0^t \dot{m} dt = \int_0^t c S_s p_n (1 - \varphi) / p_0(t) dt, \quad (17)$$

и, соответственно, выражение для изменения температуры жидкости в процессе АВ и ВВ будет иметь вид

$$\Delta T = \left( P_T t - q \int_0^t c S_s p_n (1 - \varphi) / p_0(t) dt \right) / (m_1 c_1 + m_b c_b). \quad (18)$$

При подстановке в полученную формулу выражения для мощности АВ, определяющего нагрев жидкой среды, получим

$$\Delta T = \left[ \left( S_a \rho c_c 2\pi^2 f^2 A_m^2 - c_r S \rho / 2(2\pi f A_m + 1 / \pi^2 \sqrt{3 P_0 \gamma / \rho})^3 \right) t - q c S_s \int_0^t p_n (1 - \varphi) / p_0(t) dt \right] / (m_1 c_1 + m_b c_b). \quad (19)$$

Приведем пример для случая АВ без откачки воздуха из ВК для исходных данных  $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_c = 1,5 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ ,  $f = 40 \cdot 10^3 \text{ Гц}$ ,  $A_m = 10^{-6} \text{ м}$ ,  $S_a = 7,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ,  $S = 12,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ ,  $c_r = 1,11$ ;  $\gamma = 1,4$ ,  $S_s = S$ ,  $q = 2,3 \cdot 10^3 \text{ Дж/г}$ ,  $m_1 = 150 \text{ г}$ ,  $m_b = 215 \text{ г}$ ,  $c_1 = 4,2 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг·К)}$ ,  $c_b = 0,48 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг·К)}$ ,  $p_n = 1,9 \text{ кПа}$ ,  $P_0 = p_0$  от 100 кПа до 1 кПа,  $c = 13,8 \text{ кг/(с·м}^2)$ ,  $\varphi = 0,6$ . В этом случае для текущей температуры в процессе АВ выражение (19) примет вид

$$T(t) = T_0 + \Delta T(t) = T_0 + \frac{(42 \cdot 0,72 - 7 \cdot 1,57 - 3,07)}{0,73 \cdot 10^3} t = T_0 + 0,02215 t. \quad (20)$$

Эта зависимость будет приведена далее на графике сравнительного анализа результатов в разделе 4 (рис. 5, график 2).

### 3. Экспериментальный стенд и методика проведения экспериментов

Экспериментальные исследования по определению параметров процесса испарения жидкости со свободной поверхностью в замкнутой емкости при АВ и ВВ проводились с использованием разработанного и созданного экспериментального стенда, представленного на рис. 1. В состав экспериментального стенда входят: ВК объемом  $0,463 \text{ м}^3$ ;

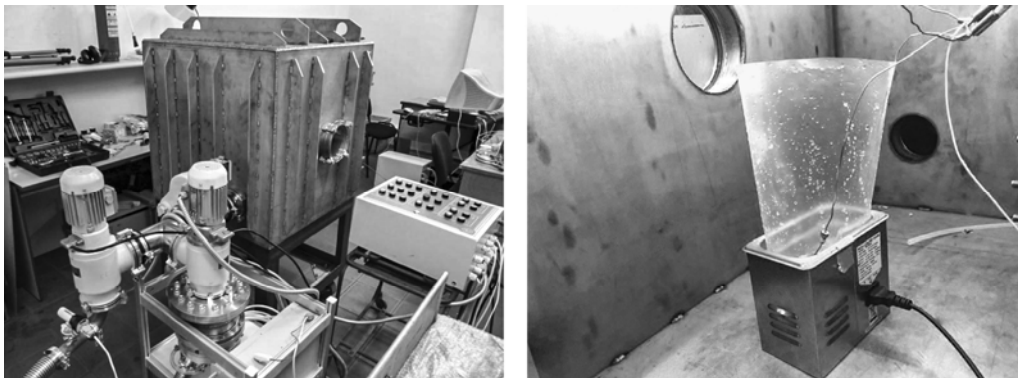


Рис. 1. Экспериментальный стенд.

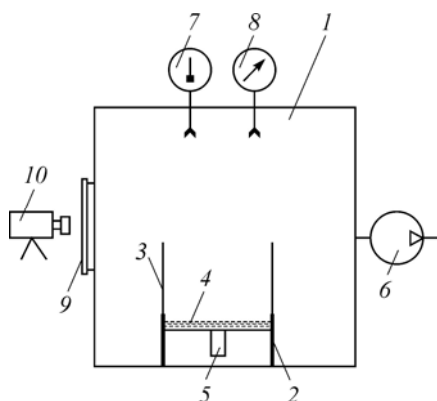


Рис. 2. Схема экспериментального стенда.

1 — ВК, 2 — ванна, 3 — защитная пленка от разбрызгивания жидкости, 4 — жидкость, 5 — ПКИ, 6 — форвакуумный насос, 7 — мобильные датчики температуры, 8 — датчик давления, 9 — смотровое окно в ВК, 10 — видеокамера.

ванна из нержавеющей стали для размещения жидкости с защитной пленкой от разбрызгивания капель, длина, ширина и высота которой равны 0,150, 0,085 и 0,065 м соответственно, а масса составляет 762,9 г; пьезокерамический излучатель (ПКИ) с частотой 40 кГц и звуковым давлением 120 Дб; форвакуумный насос со скоростью откачки  $6,5 \text{ дм}^3/\text{с}$  и предельным остаточным давлением 1 Па; система измерений, регистрации и обработки результатов измерений, в которую входят мобильные датчики температуры, датчик давления, видеокамера и многоканальный измеритель температуры; соединительная и запорная арматура, состоящая из системы шлангов, штуцеров и пневмоклапанов. При проведении экспериментальных исследований в качестве испаряемой жидкости использовалась дистиллированная вода.

Схема экспериментального стенда представлена на рис. 2. Методика проведения экспериментов заключается в использовании в замкнутой емкости двух видов воздействий (АВ и ВВ) и измерении количественных характеристик параметров процесса испарения жидкости для установления в последствии закономерности (регрессионного уравнения). Окончание эксперимента происходит по истечении фиксированного времени его проведения, которое определяется выходом измеряемых параметров на установившийся режим. Появление льда не является условием прекращения эксперимента. Механизм образования льда объясняется диаграммой фазовых состояний при снижении давления [17]. До начала эксперимента ванна 2 с защитной пленкой от разбрызгивания жидкости 3 размещается на платформе лабораторных весов, после чего в нее заливается жидкость 4 (дистиллированная вода) до заданного значения массы. Далее ванна 2 с жидкостью 4 помещается в ВК 1, после чего включается форвакуумный насос 6 и давление в ВК 1 постепенно уменьшается со 101 до 0,53 кПа с постоянной скоростью откачки  $6,5 \text{ дм}^3/\text{с}$  либо фиксируется на отметках 1,33 или 6,66 кПа путем отключения форвакуумного насоса 6 при достижении заданного давления в ВК 1. Одновременно с включением форвакуумного насоса 6 включается ПКИ 5, и дно ванны 2 начинает совершать колебания, при этом происходит излучение ультразвуковых волн. Температуры жидкости 4 (датчик установлен на высоте 9 мм от дна ванны), стенок ванны 2 и газа внутри ВК 1 определяются с помощью мобильных датчиков температуры 7. Давление в ВК 1 определяется с помощью датчика давления 8. Через смотровое окно 9 в ВК 1 происходит визуализация процесса испарения жидкости с использованием видеокамеры 10, что позволяет наблюдать характерные изменения поведения жидкости (пыление, образование корки льда, активное кипение и т.д.). Эксперимент прекращается через 10 минут после начала, при этом форвакуумный насос 6 и ПКИ 5 отключаются. После окончания эксперимента ванна 2 с остатками жидкости размещается на платформе лабораторных весов для определения массы остатков жидкости для последующих расчетов средней скорости испарения жидкости. Измерения испарившейся массы жидкости с применением лабораторных весов ВК-3000 в ВК требуют разработки дополнительной методики, т.к. при уменьшении давления в ВК для ванны без жидкости показания весов изменяются.

Погрешность измерений температур стенок ванны, ВК, газа и жидкости с использованием многоканального измерителя температур МИТ-12 и хромель-алюмелевого термопреобразователя термопар составляет  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Погрешность измерения массы жидкости

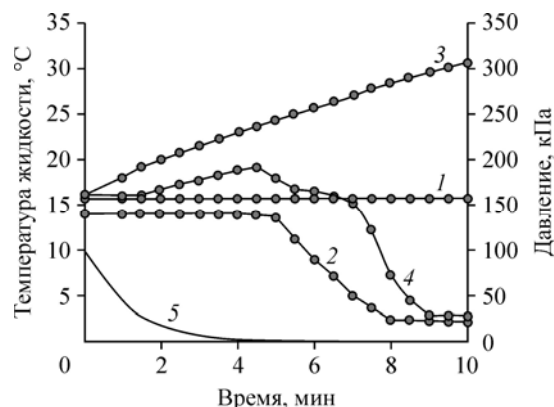


Рис. 3. График изменения температуры жидкости в ВК при постоянно уменьшающемся давлении при наличии АВ и в его отсутствие.

1 — без АВ и без ВК, 2 — без АВ в ВК, 3 — с АВ и без ВК, 4 — с АВ в ВК, 5 — давление в ВК.

с использованием лабораторных весов ВК-3000 при атмосферном давлении составила  $\pm 0,05$  г. Погрешность измерений давления в ВК с использованием датчика давления Stinger CVM211GCL составила  $\pm 2,5$  %.

#### 4. Результаты экспериментов

Процесс испарения жидкости со свободной поверхностью в ВК при АВ проводился при следующих начальных параметрах: температура газа внутри ВК — 17–19 °C, масса испаряемой жидкости — 150 г, температура воды — 14–16 °C, начальное давление в ВК — 101 кПа, начальный уровень жидкости составлял 18 мм при высоте ванны 65 мм. Начальные температуры жидкости и газа определялись по показаниям мобильных датчиков 7 (рис. 2). Эксперименты проводились в течении 10 минут при АВ и без него для трех случаев: при постоянно уменьшающемся давлении в ВК с 101 до 0,53 кПа (рис. 3), при фиксированном давлении в ВК, равном 1,33 кПа (рис. 4), при фиксированном давлении в ВК, равном 6,66 кПа (рис. 4). Как видно из результатов, представленных на рис. 3,

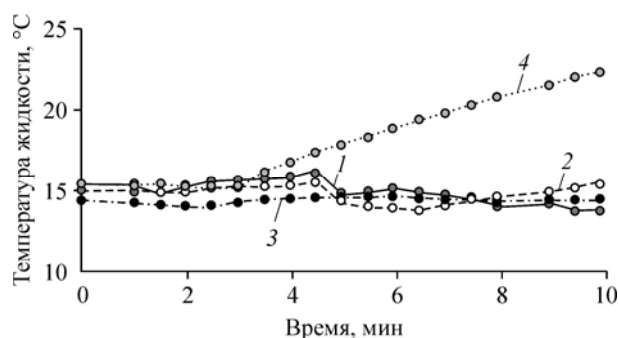


Рис. 4. График изменения температуры жидкости в ВК при наличии АВ и в его отсутствие при фиксированных давлениях.

1 — без АВ при давлении 1,33 кПа, 2 — с АВ при давлении 1,33 кПа, 3 — без АВ при давлении 6,66 кПа, 4 — с АВ при давлении 6,66 кПа.

температура жидкости в отсутствие АВ и условий пониженного давления (график 1) остается неизменной на протяжении всего эксперимента. При наличии АВ на жидкость в условиях атмосферного давления (график 3) наблюдается повышение температуры жидкости на 14,7 °С (с 16 °С до 30,7 °С). Включение форвакуумного насоса и создание условий пониженного давления в ВК до 0,53 кПа при наличии АВ (график 4) и в его отсутствие (график 2) приводит к резкому уменьшению температуры жидкости, начиная с момента времени 5 минут от начала эксперимента, когда давление в ВК составляет 1 кПа. При этом в конце эксперимента на поверхности жидкости наблюдается образование корки льда толщиной до 2 мм. Датчик температуры жидкости установлен ниже уровня свободной поверхности, на которой образуется лед, поэтому на рис. 3 для графиков 2, 4 температура жидкости является положительной. При АВ происходит интенсивное постоянное перемешивание жидкости, поэтому ее температура по объему постоянна и разницы ее значений на дне и поверхности не наблюдается. В отсутствие АВ предположительно будет присутствовать разница температур жидкости на поверхности и у дна ванны, однако для оценки этой величины необходимы дополнительные исследования.

Как видно из результатов, представленных на рис. 4, температура жидкости при постоянном давлении в ВК 6,66 кПа без АВ (график 3) и при постоянном давлении в ВК 1,33 кПа с АВ (график 2) и без АВ (график 1) остается практически неизменной на протяжении всего эксперимента. Включение ПКИ при постоянном давлении в ВК, равном 6,66 кПа (график 4), приводит к увеличению температуры жидкости с момента включения ПКИ (3-я минута эксперимента) на 7,2 °С (с 15,3 °С до 22,5 °С). При достижении на пятой минуте эксперимента в ВК давления газа 1,33 кПа наблюдается активное образование пузырей на поверхности жидкости как с АВ, так и без него, которое продолжается в течение 30 секунд (графики 1, 2). АВ приводит к дополнительному образованию пузырей на поверхности жидкости. При этом температура жидкости уменьшается (графики 1, 2) на 1,1–1,4 °С, что связано с пониженным давлением в ВК, составляющим 1,33 кПа.

Акустическое воздействие на жидкость приводит к увеличению ее температуры до достижения давлением определенной величины. Следовательно, существуют области параметров АВ и давления, при которых интенсивность испарения жидкости существенно меняется. В табл. 1 приведены значения испарившейся массы жидкости при совместном АВ и ВВ, а также при атмосферном давлении без АВ и с АВ. На экспериментально полученных графиках рис. 5 показаны также зависимости изменения температуры жидкости, полученные в соответствии с математической моделью влияния АВ и давления парогазовой смеси на процесс испарения жидкости. Расхождение результатов математического моделирования и экспериментальных исследований составляет не более 10 %, причем наибольшее расхождение приходится на время после 8–9 минуты, что связано с процессом непрерывного снижения давления в ВК в отсутствие АВ, когда начинается процесс замерзания жидкости. Такое расхождение объясняется тем, что предложенная модель этот процесс не учитывает.

**Таблица 1**  
**Масса испарившейся жидкости при различных видах воздействия**

| № | Давление в ВК                                    | Масса испарившейся жидкости, г |                |                |         |
|---|--------------------------------------------------|--------------------------------|----------------|----------------|---------|
|   |                                                  | Без АВ<br>и ВВ                 | АВ<br>(без ВВ) | ВВ<br>(без АВ) | АВ + ВВ |
| 1 | Атмосферное                                      | 0,1                            | 0,6            | –              | –       |
| 2 | Постоянно уменьшающееся<br>с 101 кПа до 0,53 кПа | –                              | –              | 8,3            | 10,2    |
| 3 | Фиксированное 6,66 кПа                           | –                              | –              | 1,3            | 1,8     |
| 4 | Фиксированное 1,33 кПа                           | –                              | –              | 2              | 3,3     |

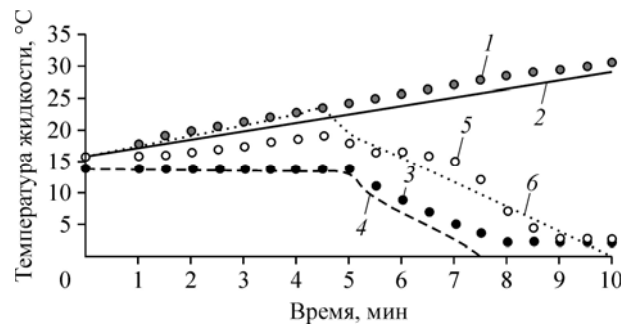


Рис. 5. Сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований и математического моделирования.

1 — с АВ и без ВК (эксперимент), 2 — с АВ и без ВК (уравнение (20)), 3 — без АВ в ВК (эксперимент), 4 — без АВ в ВК (уравнение (19) с обнулением частоты и амплитуды колебаний), 5 — с АВ в ВК (эксперимент), 6 — с АВ в ВК (уравнение (19)).

### 5. Уравнение регрессионной зависимости

Для определения уравнения регрессии для скорости испарения жидкости по испарившимся массам при АВ  $\dot{m}$  ( $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ) с зависимостью от мощности АВ  $Q_z$  и скорости откачивания  $U_v$  в интервале времени  $t \in [t_0, t_k]$  необходимо провести ряд экспериментов с заданием этих воздействий. Ввиду одной возможной мощности  $Q_z$  и одной скорости откачивания  $U_v$  регрессионное уравнение можно получить с линейной зависимостью от этих воздействий, учитывая при этом их отключения. Для получения регрессионного уравнения как функции, в том числе и от времени (полиномы 2–3-й степени) на интервале до  $t_k$ , необходимо провести несколько замеров по времени: для полинома 2-й степени — для 3-х моментов времени, для полинома 3-й степени — для 4-х моментов времени, что приводит к необходимости получения значений параметров для 13 экспериментов, которые приведены в табл. 2.

Значения масс жидкости в разные моменты времени  $t_r$  ( $t_0 = 0$  мин,  $t_1 = 3$  мин,  $t_2 = 5$  мин,  $t_3 = 7$  мин,  $t_4 = 10$  мин) можно представить в виде

$$m(t_r) = a_{00} \cdot 1 + a_{10} \cdot Q_z + a_{01} \cdot U_v + a_{11} \cdot Q_z \cdot U_v. \quad (21)$$

На основе данных табл. 2 и начальной массы жидкости  $m(t_0) = 150$  г определяются коэффициенты  $a_{ij}$ , и изменения массы на заданные моменты времени принимают вид

Таблица 2

Экспериментальные данные

| № эксперимента | Время, мин | $Q_z$ , Вт | $U_v$ , $\text{дм}^3/\text{с}$ | $m(t_r)$ , г; $\Delta m(t_r)$ |
|----------------|------------|------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 1              | 0 – 10     | 0 0        | 0 0                            | 149,9; 0,1                    |
| 2              | 0 – 3      | 35 35      | 0 0                            | 149,8; 0,2                    |
| 3              | 0 – 3      | 0 0        | 6,50 6,50                      | 149,8; 0,2                    |
| 4              | 0 – 3      | 35 35      | 6,50–6,50                      | 149,2; 0,8                    |
| 5              | 0 – 5      | 35 35      | 0 0                            | 149,7; 0,3                    |
| 6              | 0 – 5      | 0 0        | 6,50 6,50                      | 148,8; 1,2                    |
| 7              | 0 – 5      | 35 35      | 6,50 6,50                      | 147,5; 2,5                    |
| 8              | 0 – 7      | 35 35      | 0 0                            | 149,6; 0,4                    |
| 9              | 0 – 7      | 0 0        | 6,50 6,50                      | 145,4; 4,6                    |
| 10             | 0 – 7      | 35 35      | 6,50 6,50                      | 143,4; 6,6                    |
| 11             | 0 – 10     | 35 35      | 0 0                            | 149,4; 0,6                    |
| 12             | 0 – 10     | 0 0        | 6,50 6,50                      | 141,7; 8,3                    |
| 13             | 0 – 10     | 35 35      | 6,50 6,50                      | 139,8; 10,2                   |

$$\delta m(t_1) = 0,03 + 0,004857 Q_z + 26,154 U_v + 1,89 Q_z U_v, \quad (22)$$

$$\delta m(t_2) = 0,05 + 0,007143 Q_z + 176,923 U_v + 4,6154 Q_z U_v, \quad (23)$$

$$\delta m(t_3) = 0,07 + 0,009428 Q_z + 696,923 U_v + 7,340659 Q_z U_v, \quad (24)$$

$$\delta m(t_4) = -0,10 + 0,014286 Q_z + 1261,538 U_v + 6,153846 Q_z U_v. \quad (25)$$

Значения скорости испарения жидкости  $\dot{m}(t_r)$  можно приближенно получить из масс испарившейся жидкости с площади поверхности  $S$  в виде конечных разностей ( $\Delta t_r = t_r - t_{r-1}$ ,  $\Delta t_{r+1} = t_{r+1} - t_r$ )

$$\begin{aligned} \dot{m}(t_r) = & -(m(t_{r+1}) - m(t_r)) \cdot \Delta t_r / \Delta t_{r+1} / (\Delta t_{r+1} + \Delta t_r) / S - (m(t_r) - m(t_{r-1})) \cdot \Delta t_{r+1} / \Delta t_r / (\Delta t_{r+1} + \\ & + \Delta t_r) / S = -[(\delta m(t_{r+1}) - \delta m(t_r)) \cdot b_r + (\delta m(t_r) - \delta m(t_{r-1})) \cdot c_r] / S. \end{aligned} \quad (26)$$

При  $\Delta t_1 = 3$  мин,  $\Delta t_2 = 2$  мин,  $\Delta t_3 = 2$  мин,  $\Delta t_4 = 3$  мин получаем:  $b_1 = 0,3 \text{ мин}^{-1}$ ,  $c_1 = 0,1333 \text{ мин}^{-1}$ ,  $b_2 = 0,25 \text{ мин}^{-1}$ ,  $c_2 = 0,25 \text{ мин}^{-1}$ ,  $b_3 = 0,1333 \text{ мин}^{-1}$ ,  $c_3 = 0,3 \text{ мин}^{-1}$ .

Применяя конечно-разностные выражения вида (25) и учитывая площадь поверхности испарения в ванночке  $S = 0,01275 \text{ м}^2$ , получаем следующие мгновенные скорости испарения для пяти моментов времени:

$$\dot{m}(t_0) = 0,7843 + 0,127 Q_z, \quad (27)$$

$$\dot{m}(t_1) = 0,7843 + 0,10455 Q_z + 3820,967 U_v + 83,892 Q_z U_v, \quad (28)$$

$$\dot{m}(t_2) = 0,7843 + 0,0896 Q_z + 13152,33 U_v + 107,07 Q_z U_v, \quad (29)$$

$$\dot{m}(t_3) = 0,7843 + 0,10455 Q_z + 18132,016 U_v + 51,961 Q_z U_v, \quad (30)$$

$$\dot{m}(t_4) = 0,7843 + 0,127 Q_z + 14745,5 U_v - 31,027 Q_z U_v. \quad (31)$$

По этим значениям скоростей можно получить приближенное уравнение регрессии для  $\dot{m}_*(Q_z, U_v, t)$  в виде полиномиальных интерполяций по времени при параметрах  $Q_z, U_v$ , учитывая их вывод и применимость при нормальных начальных условиях ( $T_0 = \sim 20^\circ \text{C}$ ,  $P_0 = 101 \text{ кПа}$ ), при объеме камеры  $V_K = 0,463 \text{ м}^3$  и при значениях  $Q_z$  до 35 Вт и  $U_v$  до  $0,0065 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $t = [0, 10]$  ( $t$  — в мин,  $Q_z$  — в Вт,  $U_v$  — в  $\text{м}^3/\text{с}$ ). На основе метода наименьших квадратов были получены интерполяции второй и третьей степени по времени в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{m}_*(Q_z, U_v, t) = & 0,7843 + Q_z(0,127 - 0,00757 t + 0,000902 t^2) + U_v(683,76 + \\ & + 3030,0 t - 147,0 t^2) + Q_z U_v(42,52 + 24,7 t - 3,29 t^2) [\text{г}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)], \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_*(Q_z, U_v, t) = & 0,7843 + Q_z(0,127 - 0,00398 t - 0,000192 t^2 + 0,0000746 t^3) + \\ & + U_v(-1580,0 t + 1310,0 t^2 - 101,0 t^3) + \\ & + Q_z U_v(52,0 t - 7,78 t^2 + 0,226 t^3) [\text{г}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)]. \end{aligned} \quad (33)$$

Погрешности для уравнения (31) при сравнении со скоростями из экспериментов (30) на момент времени  $t_4$  составили до 10,5 %:

- при  $Q_z = 35 \text{ Вт}$ ,  $U_v = 0,0065 \text{ м}^3/\text{с}$  разница скоростей  $\dot{m}_*(t_4) = 1,31 \text{ г}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  и  $\dot{m}(t_4) = 1,2 \text{ г}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  соответствует 9,1 %;
- при  $Q_z = 0,0 \text{ Вт}$ ,  $U_v = 0,0065 \text{ м}^3/\text{с}$  разница скоростей  $\dot{m}_*(t_4) = 1,36 \text{ г}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  и  $\dot{m}(t_4) = 1,23 \text{ г}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  соответствует 10,5 %;
- при  $Q_z = 35 \text{ Вт}$ ,  $U_v = 0,0 \text{ м}^3/\text{с}$  разница скоростей  $\dot{m}_*(t_4) = 0,0732 \text{ г}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  и  $\dot{m}(t_4) = 0,0667 \text{ г}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$  соответствует 9,7 %.

Для уравнения с третьими степенями (32) погрешности в аналогичных перечисленным выше случаях на момент времени  $t_4$  составили до 7,3 %:

- при  $\dot{m}_*(t_4) = 1,16 \text{ г/(с·м}^2\text{)}$  и  $\dot{m}(t_4) = 1,2 \text{ г/(с·м}^2\text{)}$  — 3,3 %,
- при  $\dot{m}_*(t_4) = 1,19 \text{ г/(с·м}^2\text{)}$  и  $\dot{m}(t_4) = 1,23 \text{ г/(с·м}^2\text{)}$  — 3,2 %,
- при  $\dot{m}_*(t_4) = 0,0716 \text{ г/(с·м}^2\text{)}$  и  $\dot{m}(t_4) = 0,0667 \text{ г/(с·м}^2\text{)}$  — 7,3 %.

Таким образом, уравнение регрессии с интерполяциями третьего порядка по времени является более точной и тем самым предпочтительнее для применения.

## 6. Обсуждение полученных результатов

1. Согласно данным, приведенным в табл. 1, при совместных акустическом и вакуумном воздействиях масса испарившейся жидкости за 10 мин составила 10,2 г, а при раздельном воздействии этих факторов масса испарившейся жидкости за 10 мин составила соответственно 0,6 и 8,3 г (в сумме 8,9 г), что дает увеличение на ~ 13 %.

Фактически речь идет о синергетическом эффекте, т.к. исследуемая система характеризуется следующими свойствами [18]: нелинейным сложным движением жидкости и газа, интенсивным обменом вещества и энергии, взаимодействием протекающих процессов, термодинамической неравномерностью.

Акустическое воздействие сопровождается кавитацией, микропотоками жидкости и вихревыми течениями, что проявляется в виде нагрева жидкой среды за счет разогрева парогазовой смеси в кавитирующих пузырьках, что соответственно увеличивает скорость испарения. В то же время ВВ приводит к снижению парциального давления паров жидкости над свободной поверхностью и снижению температуры кипения.

2. Образование корки льда при совместных АВ и ВВ обуславливается интенсивным уносом тепловой энергии из жидкости. В соответствии с диаграммой фазового состояния жидкости при снижении давления происходит смещение точки фазового перехода. В рассматриваемом случае при снижении давления точка замерзания жидкости смещается влево от нуля, а при АВ осуществляется подогрев жидкости, т.е. наблюдается смещение точки замерзания вправо. Итоговое смещение точки замерзания жидкости (номинальное положение для воды: 0 °С, давление 1 атм) зависит от типа жидкости, ее массы, интенсивности АВ, величины ВВ.

3. Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований показали близкое соответствие изменения температур жидкости при АВ и ВВ. Расхождение результатов математического моделирования и экспериментальных исследований составило не более 10 %.

4. Исследование влияния АВ и ВВ на процесс испарения жидкости по отдельности и в совокупности показало следующее:

- использование АВ приводит к увеличению температуры жидкости на 14,7 °С (рис. 3, график 3) и к увеличению скорости испарения в 1,6 раза (табл. 1);
- при АВ внутри жидкости выделяется теплота, соответственно увеличивается время ВВ, что, следовательно, приводит к увеличению времени, после которого происходит замерзание жидкости (например, на рис. 3 (графики 2 и 4) видно, что при АВ жидкость замерзает через 9 минут после начала эксперимента, а без АВ — через 8 минут).

5. Анализ регрессионного уравнения показывает, что:

- диапазон применимости регрессионного уравнения с изменением давления до 0,53 кПа составляет по массе жидкости 10–75 г и по времени воздействия до 5 минут, исключая замерзание жидкости; для массы жидкости 75–300 г время воздействия составляет до 10 минут;
- точность предложенного регрессионного уравнения составляет до 10 %;
- возникает возможность оценить влияние каждого фактора (АВ и ВВ) в процессе эксперимента.

6. Дальнейшие рекомендации по исследованиям сводятся к следующему. Было бы полезно выполнить оценку интенсивности АВ при различных частотах и амплитудах,

а также оценку использования других жидкостей; провести исследования по определению оптимального сочетания факторов АВ, давления, температуры, влияющих на эффективность процесса испарения жидкости; разработать методики измерения текущей испаряющейся массы жидкости в процессе эксперимента в ВК.

### Выводы

1. Разработана математическая модель оценки влияния акустического и вакуумного воздействий на температуру жидкости и скорость ее испарения.
2. Проведены эксперименты, подтверждающие достоверность математического описания с точностью до 10 %.
3. Получено регрессионное уравнение, описывающее скорость испарения жидкости как функций давления и акустического воздействия.

### Список литературы

1. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
2. Розенберг Л.Д. Физика и техника мощного ультразвука. Т. 3. Физические основы ультразвуковой технологии. М.: Наука, 1970. 689 с.
3. Виноградов Б.В., Федин Д.А. Влияние частоты и амплитуды ультразвуковых колебаний на интенсивность кавитации // Вопросы химии и химических технологий. 2003. № 4. С. 141–144.
4. Minnaert M. On musical air-bubbles and the sounds of running water // Philosophical Magazine. 1933. Vol. 16. P. 235–248.
5. Choo K.M., Khmelev V.N., Shalunov A.V., Lee H.-J., Lebedev A.N., Khmelev M.V. Compact ultrasonic dryer for capillary-porous and loose materials // Ninth Intern. Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2008: Workshop Proceedings. Novosibirsk: NSTU. 2008. P. 295–299.
6. Габайдуллин А.А., Пяткова А.В. Особенности акустического течения при учете теплообмена // Акустический журнал. 2016. Т. 62, № 3. P. 288–294.
7. Rey T., Bailliet H., Valiere J.C. Experimental investigation of acoustic streaming in a cylindrical wave guide up to high streaming Reynolds number // J. Acoustical Society America. 2014. Vol. 135. P. 27–37.
8. Перминов С.А., Ермаков Г.В. Вскипание перегретой воды и водных растворов под действием ультразвука // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 1. С. 119–125.
9. Трушляков В.И., Лесняк И.Ю., Гальфетти Л. Экспериментальные исследования процесса конвективного теплообмена при испарении керосина и воды в замкнутом объеме // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 5. С. 771–781.
10. Трушляков В.И., Куденцов В.Ю., Лесняк И.Ю., Рожаева К.А., Лаврук С.А., Дронь М.М., Жариков К.И. Обеспечение достоверности физического моделирования процесса испарения модельной жидкости // Вестник машиностроения. 2016. № 10. С. 14–17.
11. Семенов А.А., Феоктистов Д.В., Зайцев Д.В., Кузнецов Г.В., Кабов О.А. Экспериментальное исследование испарения капли жидкости на нагреваемой твердой поверхности // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 6. С. 801–804.
12. Гатапова Е.Я., Филипенко Р.А., Люлин Ю.В., Граур И.А., Марчук И.В., Кабов О.А. Экспериментальное исследование температурного поля в двухслойной системе жидкость–газ // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 6. С. 729–734.
13. Кузнецов В.В. Тепломассообмен на поверхности раздела жидкость–пар // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2011. № 5. С. 97–107.
14. Trushlyakov V.I., Lavruk S.A. Theoretical and experimental investigations of interaction of hot gases with liquid in closed volume // Acta Astronautica. 2015. № 109. P. 241–247.
15. Пат. 2461890 Российская федерация, МПК G09B23/00. Способ моделирования процесса газификации остатков жидкого ракетного топлива в баках отделившейся части ступени ракеты-носителя и устройство для его реализации / Трушляков В.И., Куденцов В.Ю., Казаков А.Ю., Курочкин А.С., Лесняк И.Ю., Полунин М.В.; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. № 2010141530/12; заявл. 08.10.2010; опубл. 20.09.2012, Бюл. № 26. 9 с.
16. Пат. 2474816 Российская федерация, МПК G01N29/02, B64G7/00. Способ моделирования процесса газификации остатков жидкого ракетного топлива и устройство для его реализации / Трушляков В.И., Куденцов В.Ю., Казаков А.Ю., Курочкин А.С., Лесняк И.Ю.; заявитель и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. № 2010149031/11; заявл. 30.11.2010; опубл. 10.02.2013, Бюл. № 4. 7 с.
17. Кухлинг Х. Справочник по физике. М.: Мир, 1982. 520 с.
18. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 320 с.

*Статья поступила в редакцию 29 декабря 2017 г.,  
после переработки — 30 мая 2018 г.,  
принята к публикации 11 декабря 2018 г.*