

МЕТОДЫ ИСПАРЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ АКУСТИКО-ВАКУУМНОГО И ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЙ (ОБЗОР)

О. Л. Прусова

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Проанализированы базовые воздействия и их комбинации на испаряемую жидкость, расположенную на твердой поверхности и в виде взвешенной капли. Рассмотрены методы и способы применения данных воздействий для испарения жидкости при следующих граничных условиях расположения жидкости: «капля», «пленка». Предложена классификация одно-, двух- и трехфакторных воздействий на испаряемую жидкость. Сформулировано направление дальнейших исследований в области совместного применения конвективного, кондуктивного и вакуумного воздействия на осушаемый объект.

Ключевые слова: испарение жидкости, капля, пленка, тепловое и акустико-вакуумное воздействие, многофакторное воздействие, классификация воздействий на испаряемую жидкость.

Введение

При производстве изделий ракетно-космической техники сушка поверхностей является одним из ответственных технологических процессов. Качество сушки влияет на результаты проверки на герметичность, а также на возможность длительного хранения изделий без возникновения коррозии поверхностей деталей.

Общая сушка в ракетостроении выполняется либо ручной протиркой поверхностей специальными сухими салфетками, либо конвективным методом — продувкой или обдувом поверхностей сухим, желательным подогретым, воздухом. Если общей сушки недостаточно, то может применяться кондуктивно-вакуумный (термовакuumная сушка), конвективно-вакуумный или радиационно-вакуумный метод сушки [1].

Ниже рассматриваются два типа граничных условий расположения испаряемой жидкости («капля», «пленка»).

На рис. 1 приведены установки для сушки одиночных капель [2]. Результаты моделирования испарения капель жидкости имеют фармацевтическое, экологическое, инженерное применение, например, при сжигании спрея, распылительном охлаждении, распылительной сушке, пожаротушении и т.д. При самовоспламенении смеси паров топлива и воздуха в дизельных двигателях происходит капельный нагрев и испарение. Так как современные топлива являются сложными многокомпонентными жидкостями, то проводятся исследования испарения многокомпонентных капель [3–5].

Изучение испарения пленок жидкости вызвано широким промышленным применением процессов тепло- и массообмена, сопровождающих испарение тонких пленок жидкости, например, при кондиционировании воздуха, опреснении,

деминерализации, сушке, в устройствах пищевой, химической, энергетической промышленности (абсорберах, теплообменниках, конденсаторах, испарителях, дистилляционных колоннах) [6, 7].

С целью создания научно-методической базы для исследования существующих методов испарения жидкости и их дальнейшей разработки предлагается провести анализ и классификацию этих методов.

Постановка задачи

В соответствии со сформулированной выше целью необходимо решить ряд следующих задач:

1. Анализ исследуемых воздействий на испаряемую жидкость.
2. Рассмотрение одно-, двух- и трехфакторных воздействий на испаряемую жидкость.
3. Классификация воздействий на испаряемую жидкость.

1. Анализ исследуемых воздействий на испаряемую жидкость

В результате проведенного обзора работ, посвященных вопросам испарения жидкости, расположенной на твердой поверхности и в виде взвешенной капли, можно выделить три базовых воздействия на испаряемую жидкость:

- вакуумное воздействие;
- акустическое воздействие (а именно ультразвуковое);
- тепловое воздействие, которое можно разделить на три типа в зависимости от вида теплопередачи:
 - конвективное воздействие;
 - кондуктивное воздействие — воздействие, в основе которого лежит механизм теплопроводности;

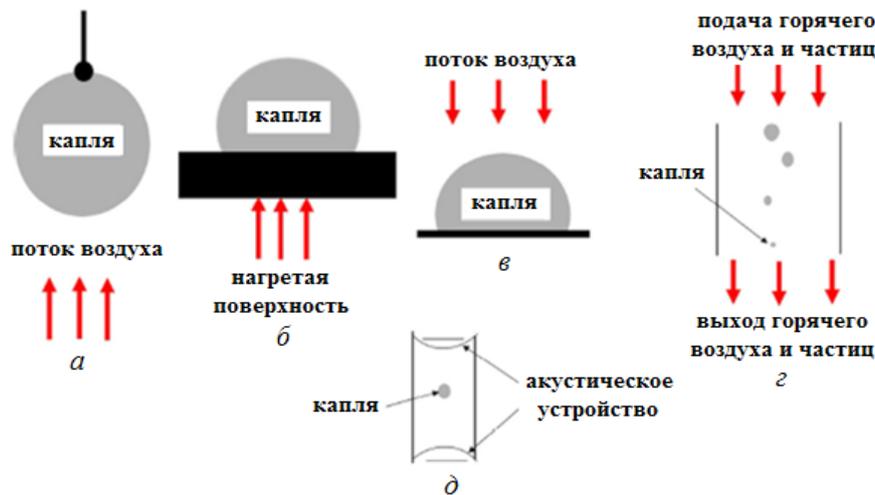


Рис. 1. Установки для испарения одиночных капель [50]:
 а — конвективное воздействие: взвешенная капля (метод, применяемый в [50]);
 б — кондуктивное воздействие; в — конвективное воздействие: капля,
 расположенная на горизонтальной поверхности с подачей горячего воздуха,
 как указано;
 г — испарение при свободном падении одиночных капель;
 д — установка акустического подвеса для испарения одиночных капель

Fig. 1. Single droplet drying set-up:

a — convective effect: suspended droplet (method, used in [50]);
 b — conductive effect; c — convective effect: droplet positioned
 on a horizontal surface with the supply of hot air as indicated;
 d — free falling method of single droplet drying;
 e — acoustic levitation set-up for single droplet evaporation

— радиационное воздействие — воздействие тепловым излучением.

Ниже рассматриваются методы и способы применения данных воздействий и их комбинаций для испарения жидкости при различных граничных условиях.

2. Рассмотрение одно-, двух- и трехфакторных воздействий на испаряемую жидкость

2.1. Вакуумное воздействие.

В [8, 9] с помощью вакуумного воздействия предлагается удалять остатки теплоносителя из систем терморегулирования в ракетно-космической технике. В [8] теплоноситель из космического аппарата выпаривают в вакуум — окружающее космическое пространство. В [9] в гидромагистраль заправляют полностью испаряющийся компонент теплоносителя, после чего гидромагистраль вакуумируют.

Для уменьшения продолжительности осушки отключенного участка магистрального газопровода, осуществляемой путем вакуумирования, в [10] предлагается для создания вакуума совместно использовать водокольцевой насос и эжектор, а в [11, 12] — вакуумирование проводить в несколько этапов с изменением величины давления на каждом этапе.

2.2. Акустическое воздействие.

В [13] для сушки топливных баков ракет предлагается применение ультразвукового воздействия. Ультразвуковые излучатели рекомендуются крепить на наружной стороне бака в перекрестях ячеек плиты (при вафельной структуре

обечайки) либо в местах расположения подкреплений (в баках из листового профиля и профиля с поперечным и продольным подкреплением).

2.3. Конвективное воздействие.

2.3.1. Вынужденная конвекция.

Как отмечалось выше, вынужденная конвекция применяется на предварительном этапе сушки изделий ракетно-космической техники — общей сушке, выполняемой продувкой или обдувом поверхностей сжатым сухим, желательнее подогретым, воздухом [1].

В [14] сушку внутренних поверхностей длинномерных труб предлагается проводить циклами. Во время цикла — продувать трубы теплоносителем (горячим воздухом), а между циклами — перекачивать трубы с одной позиции на другую с целью равномерного распределения неиспарившейся жидкости по всей внутренней поверхности трубы.

Работы [2, 4, 5, 15, 16] посвящены теоретическому исследованию испарения капли жидкости под влиянием вынужденной конвекции. В [5] описывается разработанная новая модель испарения однокомпонентной капли в высокотемпературных потоках воздуха, основанная на теории пленок. Модель учитывает зависимость плотности газа от температуры и концентрации пара. В [4] приводятся результаты численного параметрического исследования влияния состава и температуры воздуха и жидкости на испарение одной многокомпонентной капли (из бинарной смеси этанола и изооктана) с поверхности под воздействием потока горячего воздуха. В [15] форма испаряющейся капли описана как сплюснутый сфероид, поскольку при вынужденной

конвекции из-за деформации капли эта форма ближе к реальности, чем сфера. В работе определено, что время и массовая скорость испарения сплюснутой сфероидальной капли меньше, чем у сферической капли с той же площадью поверхности. В [2] численно моделировалась сушка капли, подвешенной на кончике стеклянной нити накала в восходящем потоке воздуха (рис. 1). Проведено параметрическое исследование влияния размеров стеклянной ручки на скорость испарения капли для разных размеров взвешенной капли. В [16] численно моделировалось взаимодействие капель жидких остатков ракетного топлива с газовым потоком вводимого теплоносителя в условиях малых гравитационных полей.

Работы [17–22] посвящены экспериментальному исследованию испарения жидкости под влиянием вынужденной конвекции. В [17, 18] испарение капель и пленок керосина и воды происходило в экспериментальной установке, имитирующей типовой объем топливного бака ракеты-носителя. В [19] капли и пленки керосина, воды, водно-спиртовой смеси испаряли с твердой поверхности с целью уменьшения разброса температуры теплоносителя на входе в экспериментальную установку. В [20] капли воды, керосина, ацетона, спиртовой смеси, расположенные на наклонной поверхности, под разными углами (три варианта) обдували теплоносителем. В [21] капли модельной жидкости, расположенные на горизонтальной поверхности, обдували теплоносителем, вводимым через патрубок, выполненный в виде шаро-шарнирного соединения, что позволяло изменять угол ввода в ходе эксперимента. В [22] проведено параметрическое исследование влияния скорости потока воздуха, проходящего над жидкостью (вода), на коэффициент массопередачи, отнесенный к единице поверхности контакта фаз (вода-воздух).

В [23] численно и экспериментально исследовано испарение подвешенной капли чистой жидкости в сухой воздух при различных начальных температурах капли и воздуха и скорости обтекания. В [24] приведена полуаналитическая модель и результаты физических экспериментов испарения неподвижной капли с твердой поверхности в турбулентном потоке. Исследования были проведены для различных размеров капли жидкости, окружающей температуры, скорости набегающего потока и интенсивности турбулентности.

2.3.2. Естественная конвекция.

В [25] проведено теоретическое параметрическое исследование влияния начального радиуса капли и температуры и влажности окружающей среды на процесс испарения одной капли воды, происходящий в застойном (неподвижном) газовом пространстве.

В [26] теоретически и экспериментально исследовано испарение взвешенных капель метанола, обычного керосина и авиационного керосина в спокойной высокотемпературной среде. Предложенная авторами модель испарения капли жидкости впервые учитывает эффект естественной конвекции.

2.4. Кондуктивное воздействие.

Работы [27–31] посвящены испарению пленок жидкости при кондуктивном воздействии.

В [27] проведено численное параметрическое исследование влияния угла смачивания на процесс испарения пленки воды в круглых и квадратных микрополостях в нагретой стенке. Проведена оптимизация процесса испарения жидкости с изменением конструкции. В [28] численно моделировалось движение трехмерных частиц в пленке испаряющейся воды, расположенной на нагреваемой стенке. В [29] экспериментально исследовалось испарение пленок воды, метанола, изопропанола, стекающих по вертикальной нагреваемой трубе. В [30] приведены результаты параметрического экспериментального исследования температурного поля в области межфазной границы в двухслойной системе жидкость-газ поперек слоев при локальном нагреве (в заданном диапазоне температур) жидкости со стороны подложки и при интенсивном испарении жидкости. В [31] проведено численное и экспериментальное параметрическое исследование степени испарения пленки соленой воды, стекающей по нагреваемой стенке дистилляционной ячейки.

В работах [32–35] исследовано испарение капель жидкости при кондуктивном воздействии. В [32] представлены результаты численного исследования влияния начального размера капли, температуры нагретой поверхности и динамического угла контакта на процесс испарения микрокапель воды. В [33] экспериментально исследовано влияние свободной конвекции в жидкости и газе на теплообмен при испарении капель воды и водно-солевого раствора, расположенных на горизонтальной цилиндрической поверхности определенной температуры. Работы [34, 35] посвящены испарению капли воды с нагреваемой поверхности с регулируемой смачиваемостью при подвижной, частично подвижной и полностью неподвижной линии контакта трех фаз (жидкость – газ – твердое тело). В [34] экспериментальное исследование выполнено для диапазона температур нагреваемой поверхности, в [35] экспериментальные и теоретические исследования проведены для одной температуры поверхности.

2.5. Акустико-вакуумное воздействие.

В [36] приведены результаты теоретического и экспериментального исследования влияния ультразвукового воздействия постоянной величины на испарение пленки воды в условиях пониженного давления, поддерживаемого на определенном уровне.

В [37] описаны способ и устройство для испарения пленки жидкости в условиях пониженного давления при воздействии ультразвука, создаваемого пьезоэлектрическим излучателем. Давление в ходе эксперимента фиксируется на значениях, при которых наблюдается интенсивное образование пузырьков газа в жидкости.

2.6. Конвективно-вакуумное воздействие.

В [38] для осушки магистралей системы терморегулирования после слива теплоносителя в космической технике предлагается многократно последовательно проводить вакуумирование и наддув магистралей сухим газом. После слива теплоносителя измеряется его температура, и последующая операция вакуумирования осуществляется до давления ниже давления насыщенных паров слитого теплоносителя при измеренной

температуре. Только после достижения этого давления начинается операция надува сухим газом.

В [39–43] для осушки участков магистрального газопровода осушаемую полость предлагается первоначально вакуумировать, а затем продувать инертной газовой смесью, полученной из атмосферного воздуха. Продувка ведется до достижения влажности требуемой величины на выходе из осушаемой полости. В [39, 40] осушка ведется в режиме рециркуляции газовой смеси. В [41] стационарную вакуумную продувку проводят инертной газовой смесью, которая осушается путем ее расширения при подаче в осушаемую полость за счет поддерживаемого в полости вакуума. В [42] стационарный режим вакуумной продувки осуществляют наружным атмосферным воздухом, который осушается при его дросселировании на входе в осушаемую полость. В [43] перед вакуумированием полости ее заполняют предварительно осушенным атмосферным воздухом.

2.7. Кондуктивно-вакуумное воздействие.

В [44] проведено теоретическое исследование испарения пленки воды в термовакuumных условиях с целью определения параметров, дающих наименьшие энергозатраты. Процесс испарения рассматривался для квазистационарного режима сушки.

В [36, 45] описаны проведенные теоретические и экспериментальные исследования влияния кондуктивного воздействия постоянной величины на испарение пленки воды в условиях пониженного давления, поддерживаемого на определенном уровне.

В [46] с использованием принципа максимума Понтрягина разработана математическая модель термовакuumного испарения пленки воды в замкнутом объеме, позволяющая оценить возможность уменьшения энергетических затрат на испарение за счет оптимизации циклограммы работы систем вакуумирования и подогрева.

В [37] описаны способ и устройство для испарения пленки жидкости в условиях пониженного давления при кондуктивном воздействии, осуществляемом с помощью изменения мощности электрического нагревателя и длительности его воздействия. Давление в ходе эксперимента фиксируется на значениях, при которых наблюдается интенсивное образование пузырьков газа в жидкости.

2.8. Акустико-конвективное воздействие.

В [47] описаны способ и устройство для испарения жидкости, моделирующей остатки ракетного топлива, при ультразвуковом и конвективном воздействии. Жидкость в виде капель и пленки расположена на поддоне. Ультразвуковое воздействие создается пьезоэлектрическим излучателем, конвективное воздействие — теплоносителем заданной температуры, подаваемым в экспериментальную установку под разными углами через ультразвуковой газоструйный излучатель.

2.9. Конвективно-кондуктивное воздействие.

В [48] осушаемые объекты (длинномерные изделия, преимущественно статоры электродвигателей погружных насосов) обдуваются теплоносителем при одновременной работе нагрева-

тельных элементов, нагревающих теплоноситель и осушаемые объекты.

В [6] задача нагрева пленки жидкости постоянной толщины решается полуаналитическим методом. Рассмотрено двумерное стационарное ламинарное течение жидкости, движущейся под действием силы тяжести и потока газа по нагреваемой стенке, наклоненной к горизонту.

Работы [7, 49, 50, 51] посвящены численному исследованию испарения пленки жидкости при конвективно-кондуктивном воздействии. В [7] пленка двухкомпонентной жидкости (вода + этиленгликоль) стекает по нагретой пластине вертикального канала при смешанной конвекции, при этом установлено влияние параметров поступающей в канал жидкости на толщину пленки и скорость испарения. В [49] исследуется влияние изменения продольного и поперечного размеров нагревателя (при постоянстве площади нагрева) на процесс испарения тонкой локально нагреваемой пленки вязкой несжимаемой жидкости, увлекаемой потоком газа в микроканале. В [50] с использованием принципа максимума Понтрягина разработана математическая модель испарения пленки воды при конвективно-кондуктивном нагреве в цилиндрической емкости. Модель позволяет оценить возможность уменьшения энергетических затрат за счет оптимизации циклограммы работы систем воздушной продувки и подогрева. В работе [51] проведено сравнение двух конфигураций для улучшения теплообмена при испарении двухкомпонентной (вода + этанол) жидкой пленки в вертикальном канале при смешанной конвекции. В первой конфигурации равномерный тепловой поток подводится к увлажненной стенке, а во второй — такое же количество тепла используется не для нагрева стенки, а для предварительного нагрева жидкой смеси на входе.

В [52] численно и экспериментально исследованы вопросы газификации остатков жидких топлив. Моделирование проведено для капель и пленки воды, расположенных на нагреваемой твердой поверхности, при подаче потока горячего газа (теплоносителя) под разными углами (три варианта) в замкнутый объем.

В [53] экспериментально определен коэффициент теплоотдачи от турбинной лопатки к пленке жидкости при кипении пленки на высокотемпературной поверхности лопатки и в результате испарения низкотемпературных пленок. Рассматривается система, включающая лопатку, двухфазовую среду и полидисперсный поток капель, непрерывно осаждающийся на поверхность лопатки и образующий пленку.

2.10. Радиационно-конвективное воздействие.

В [54] приведены результаты теоретических исследований испарения впрыснутой в горячий газ капли топлива (н-декана и дизельного топлива). Описываемая модель учитывает поглощение теплового излучения каплей жидкости в процессе испарения, а также изменение свойств жидкости при ее нагревании излучением.

В [55] представлены результаты экспериментального моделирования процесса газификации капли и пленки жидкости. Определены коэффициенты теплоотдачи от газа к стенкам бака, а также время и количество теплоты (конвек-

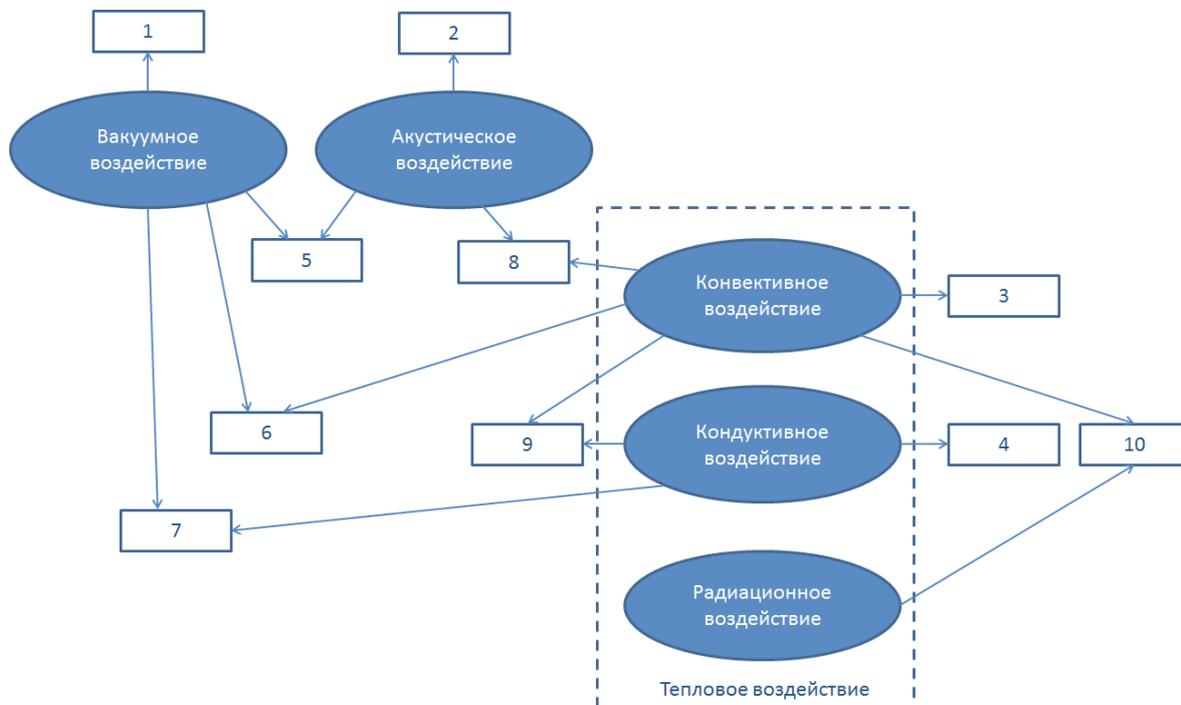


Рис. 2. Одно- и двухфакторное воздействие на испаряемую жидкость:
 1 — вакуумное; 2 — акустическое; 3 — конвективное; 4 — кондуктивное; 5 — акустико-вакуумное;
 6 — конвективно-вакуумное; 7 — кондуктивно-вакуумное; 8 — акустико-конвективное;
 9 — конвективно-кондуктивное; 10 — радиационно-конвективное

Fig. 2. One- and two-factor effect on the evaporated liquid:
 1 — vacuum; 2 — acoustic; 3 — convective; 4 — conductive; 5 — acoustic-vacuum;
 6 — convective-vacuum; 7 — conductive-vacuum; 8 — acoustic-convective;
 9 — convective-conductive; 10 — radiation-convective

тивное, лучистое), затраченные на газификацию жидких остатков компонентов топлива (керосин, кислород) в баках горючего и окислителя блока «И» ракеты-носителя «Союз-2.1в» при постоянной температуре и скорости подачи теплоносителя в баки.

В [3] проведен обзор современных работ, посвященных теоретическому и экспериментальному моделированию нагрева и испарения капель автомобильного топлива (бензинового, дизельного и биодизельного топлива, n-додекана), выявлены наиболее важные нерешенные проблемы в этой области. Модели конвективного и радиационного нагрева капель описаны отдельно.

2.11. Трехфакторное воздействие.

В [36] приведены результаты теоретического и экспериментального исследования влияния ультразвукового и кондуктивного воздействия постоянной величины на испарение пленки воды в условиях пониженного давления, поддерживаемого на определенном уровне.

В [37] описаны способ и устройство для испарения пленки жидкости при одновременном кондуктивном, ультразвуковом воздействии и воздействии давлением. Давление и кондуктивное воздействие целенаправленно изменяют в процессе испарения жидкости, ультразвуковое воздействие остается постоянным.

В [56] приведено описание способа и устройства для моделирования газификации слоя остатков жидкого компонента ракетного топлива.

Первоначально экспериментальную установку заполняют нейтральным газом, затем понижают давление и осуществляют конвективное и ультразвуковое воздействие на испаряемую жидкость путем подачи теплоносителя через газоструйный излучатель.

3. Классификация воздействий на испаряемую жидкость

Ниже предлагается классификация воздействий на испаряемую жидкость по количеству факторов (рис. 2). Каждое из приведенных на рис. 2 воздействий, в свою очередь, предлагается классифицировать по следующим признакам (рис. 3):

- 1) по граничным условиям расположения жидкости: капля, пленка;
- 2) по влиянию на процесс испарения жидкости:

2.1) параметрическое исследование — исследование, направленное на выявление влияния отдельных параметров на процесс;

2.2) регулирование — обеспечение в течение процесса постоянства заранее заданных значений параметров рассматриваемого воздействия;

2.3) управление — целенаправленное изменение регулируемых параметров рассматриваемого воздействия на основе текущей информации о состоянии процесса для достижения введенного критерия качества.

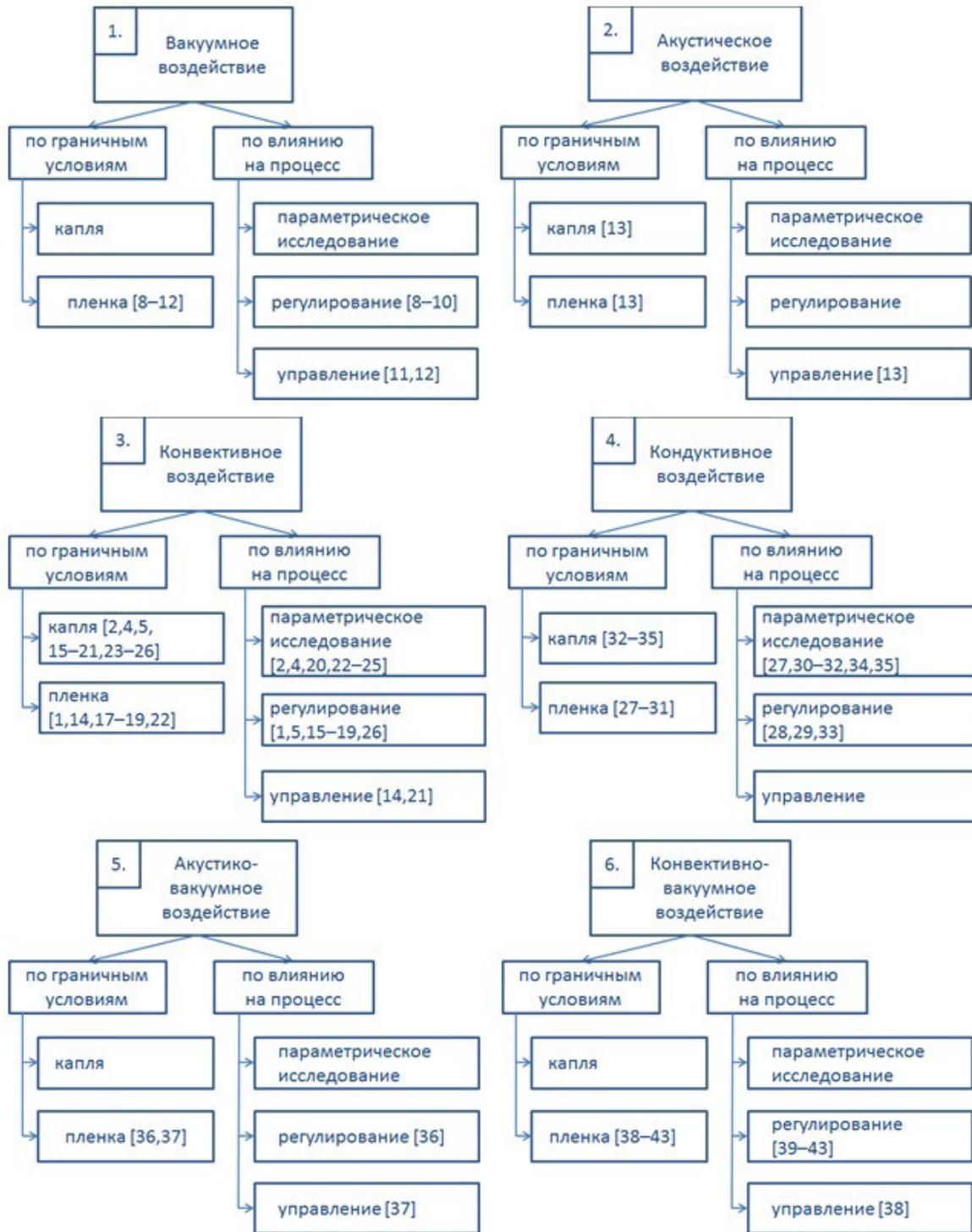


Рис. 3. Классификация одно- и двухфакторных воздействий на испаряемую жидкость
 Fig. 3. The classification of one- and two-factor effects on the evaporated liquid

Возможные пути оптимизации процесса испарения жидкости, встречающиеся в описанных работах, представлены на рис. 4.

Классификация трехфакторных воздействий на испаряемую жидкость приведена на рис. 5.

Обсуждение результатов

Применение каждого из приведенных на рис. 2 воздействий на испаряемую жидкость

имеет свои достоинства и недостатки, например, недостаток применения конвективного воздействия — длительность, а кондуктивно-вакуумно-го — высокие энергетические затраты.

При трехфакторном воздействии (рис. 5) на жидкость с целью ее испарения возможно увеличение скорости испарения жидкости. В [36] установлено, что совместное использование ультразвукового и кондуктивного воздействия в условиях пониженного давления приводит к увели-

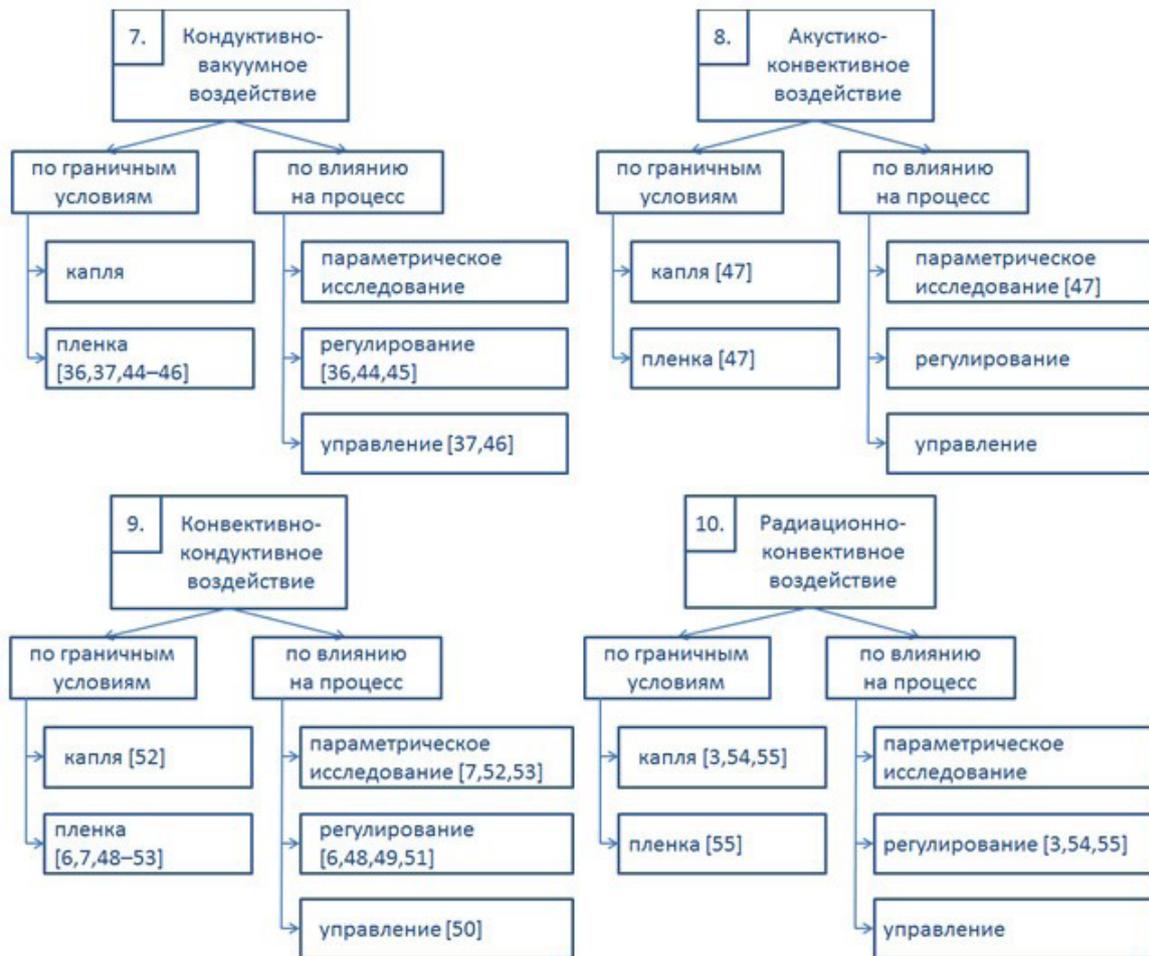


Рис. 3 (продолжение)
Fig. 3 (continuation)



Рис. 4. Пути оптимизации процесса испарения жидкости
Fig. 4. Ways to optimize the liquid evaporation process

чению скорости испарения жидкости в 1,5 раза, чем при использовании этих воздействий по отдельности.

В дальнейшем представляет интерес проведение теоретико-экспериментальных исследований в области совместного применения конвективного, кондуктивного и вакуумного воздействия на осушаемый объект. Совместное применение этих воздействий может уменьшить время суш-

ки, позволить высушить объекты больших размеров и сложной конфигурации. Однако при этом возникает вопрос об увеличении энергозатрат. Поэтому предлагается разработать физико-математическую модель трехфакторного воздействия с последующим исследованием процесса испарения, разработать требования к экспериментальным исследованиям (состав экспериментального стенда, программа экспериментальных исследо-

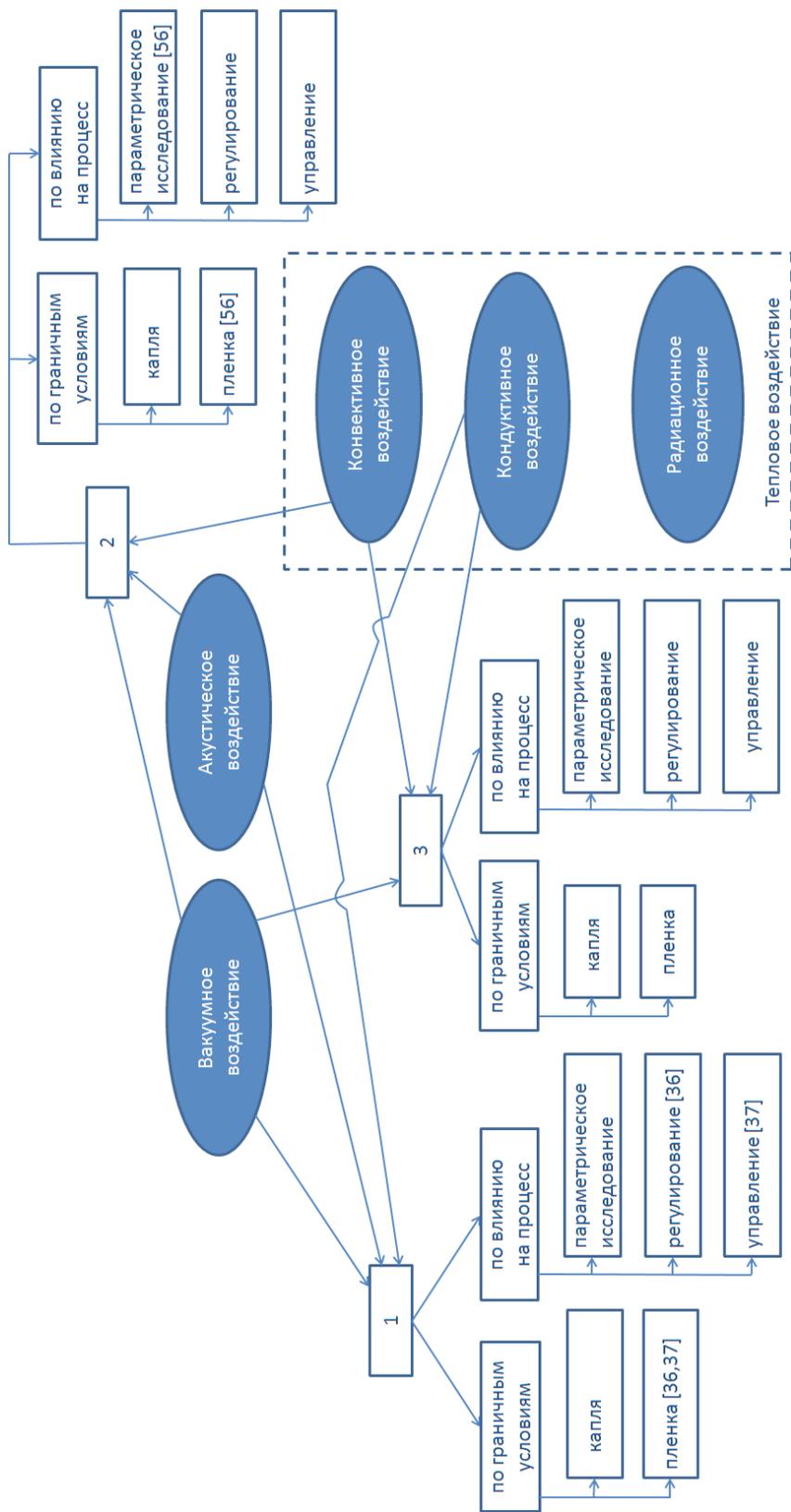


Рис. 5. Классификация трехфакторных воздействий на испаряемую жидкость:

1 — акустико-кондуктивно-вакуумное воздействие;

2 — акустико-конвективно-вакуумное воздействие;

3 — конвективно-кондуктивно-вакуумное воздействие

Fig. 5. The classification of three-factor effects on the evaporated liquid:

1 — acoustic-conductive-vacuum effect;

2 — acoustic-convective-vacuum effect;

3 — convective-conductive-vacuum effect

ваний, методика обработки результатов), провести валидацию и верификацию результатов исследований.

Выводы

1. Проведен обзор работ по вопросам испарения жидкости, расположенной на твердой поверхности и в виде взвешенной капли, при различных воздействиях на жидкость.

2. Выделены базовые исследуемые воздействия на испаряемую жидкость, проведен анализ данных воздействий и их комбинаций на испаряемую жидкость при различных граничных условиях.

3. Предложена классификация воздействий на испаряемую жидкость по количеству факторов воздействия, по граничным условиям расположения жидкости и по влиянию на процесс испарения жидкости. Выявлены возможные пути оптимизации процесса испарения жидкости.

4. Сформулировано направление дальнейших исследований в области совместного применения конвективного, кондуктивного и вакуумного воздействия на осушаемый объект с целью оптимизации затрат энергии на испарение жидкости.

Благодарности

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

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор В. И. Трушляков.

Список источников

1. ОСТ 92-0019-78. Методы и режимы сушки изделий перед испытаниями на герметичность. Введ. 1979—10—01. Л.: ГОНТИ-2, 1979. 80 с.

2. George O. A., Xiao J., Rodrigo C. S. [et al.]. Detailed numerical analysis of evaporation of a micrometer water droplet suspended on a glass filament // *Chemical Engineering Science*. 2017. Vol. 165. P. 33—47. DOI: 10.1016/j.ces.2017.02.038.

3. Sazhin S. S. Modelling of fuel droplet heating and evaporation: Recent results and unsolved problems // *Fuel*. 2017. Vol. 196. P. 69—101.

4. Banerjee R. Numerical investigation of evaporation of a single ethanol/iso-octane droplet // *Fuel*. 2013. Vol. 107. P. 724—739. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.01.003.

5. Tonini S., Cossali G. E. A novel vaporisation model for a single-component drop in high temperature air streams // *International Journal of Thermal Sciences*. 2014. Vol. 75. P. 194—203. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2013.08.004.

6. Aktershev S. P., Bartashevich M. V. Semi-analytical method for solving the problem of heating of the liquid film moving under gravity and gas flow // *International Journal of Thermal Sciences*. 2017. Vol. 111. P. 491—498. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2016.06.037.

7. Nasr A., Al-Ghamdi A. S., Feddaoui M. [et al.] Numerical study of falling binary liquid film evaporation: liquid film thickness // *Desalination and Water Treatment*. 2017. Vol. 74. P. 35—43. DOI: 10.5004/dwt.2017.20606.

8. Пат. 1830857 СССР, МПК В 64 G 1/50. Способ удаления теплоносителя из систем терморегулирования космических аппаратов / Цихоцкий В. М. № 4508100/23; заявл. 26.01.89; опубл. 09.06.95.

9. Пат. 2307774 Российская Федерация, МПК В 64 G 1/50. Способ удаления из гидромагистралей несливаемых остатков теплоносителя / Безруких А. Д. № 2005132043/11; заявл. 17.10.05; опубл. 10.10.07, Бюл. № 28.

10. Пат. 2350860 Российская Федерация, МПК F 26 В 5/04. Установка для осушки газопровода / Гофман М. С., Ловцов А. В., Дейнеженко В. И. № 2007139466/06; заявл. 24.10.07; опубл. 27.03.09, Бюл. № 9.

11. Пат. 2403517 Российская Федерация, МПК F 26 В 20/00, F 26 В 5/04. Установка для осушки газопровода / Гофман М. С. № 2009122585/06; заявл. 11.06.09; опубл. 10.11.10, Бюл. № 31.

12. Кудрявцев Д. А. Методы совершенствования технологий вакуумной осушки газопроводов: автореферат дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 25 с.

13. Пат. 2599302 Российская Федерация, МПК В 08 В 3/12. Способ ультразвуковой очистки и сушки внутренних поверхностей топливных баков / Вельц Я. Я., Вельц И. Я., Вельц Н. И., Вельц А. Я. № 2015138691/05; заявл. 11.09.15; опубл. 10.10.16, Бюл. № 28.

14. Пат. 2460953 Российская Федерация, МПК F 26 В 3/02, F 26 В 7/00, F 26 В 9/10. Установка для сушки труб и способ сушки / Артемкин А. А., Колмаков А. В. № 2011114724/06; заявл. 14.04.11; опубл. 10.09.12, Бюл. № 25.

15. Li J., Zhang J. A theoretical study of the spheroidal droplet evaporation in forced convection // *Physics Letters A*. 2014. Vol. 378 (47). P. 3537—3543. DOI: 10.1016/j.physleta.2014.10.020.

16. Шалай В. В., Трушляков В. И., Куденцов В. Ю. Моделирование начального периода функционирования системы газификации жидких остатков топлива // *Омский научный вестник*. 2015. № 1 (137). С. 15—19.

17. Trushlyakov V. I., Lesnyak I. Y., Galfetti L. An experimental investigation of convective heat transfer at evaporation of kerosene and water in the closed volume // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2017. Vol. 24, no. 5. P. 771—781. DOI: 10.1134/S0869864317050109.

18. 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 (107). С. 771—781.

19. Trushlyakov V. I., Kudentsov V. Yu., Lesnyak I. Yu., Rozhaeva K. A., Lavruk S. A., Dron' M. M., Zharikov K. I. Evaporation of a Model Liquid // *Russian Engineering Research*. 2017. Vol. 37, no. 1. P. 1—4. DOI: 10.3103/S1068798X17010221.

20. Пат. 2461890 Российская Федерация, МПК G 09 В 23/00. Способ моделирования процесса газификации остатков жидкого ракетного топлива в баках отделяющейся части ступени ракеты-носителя и устройство для его реализации / Трушляков В. И., Куденцов В. Ю., Казаков А. Ю., Курочкин А. С., Лесняк И. Ю., Полуниин М. В. № 2010141530/12; заявл. 08.10.10; опубл. 20.09.12, Бюл. № 26.

21. Пат. 2637140 Российская Федерация, МПК G 01 N 33/22. Способ моделирования процесса газификации остатков жидкого компонента ракетного топлива и устройство для его реализации / Трушляков В. И., Дронь М. М., Севоян В. А. № 2016111899; заявл. 29.03.16; опубл. 30.11.17, Бюл. № 34.

22. Воронов А. Ю., Бальчугов А. В., Ульянов Б. А. [и др.]. Статистическая обработка результатов исследования мас-

- сообменных процессов испарения воды в поток воздуха с горизонтальной свободной поверхности // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2004. Т. 1. С. 36–38.
23. Терехов В. И., Терехов В. В., Шишкин Н. Е., Би К. Ч. Экспериментальное и численное исследования нестационарного испарения капель жидкости // Инженерно-физический журнал. 2010. Т. 83, № 5. С. 829–836.
24. Navaz H. K., Chan E., Markicevic B. Convective evaporation model of sessile droplets in a turbulent flow — comparison with wind tunnel data // International Journal of Thermal Sciences. 2008. Vol. 47. P. 963–971. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2007.08.004.
25. Wu Y., Zhang X., Zhang X. Simplified analysis of heat and mass transfer model in droplet evaporation process // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 99. P. 938–943. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.020.
26. Wang F., Yang S., Yao J. [et al.]. A new stationary droplet evaporation model and its validation // Chinese Journal of Aeronautics. 2017. Vol. 30, Issue 4. P. 1407–1416. DOI: 10.1016/j.cja.2017.06.012.
27. Ahn H., Son G. Numerical simulation of liquid film evaporation in circular and square microcavities // Numerical Heat Transfer. Part A. 2015. Vol. 67. P. 934–951. DOI: 10.1080/10407782.2014.949153.
28. Hwang H., Son G. Direct numerical simulation of 3D particle motion in an evaporating liquid film // Journal of Mechanical Science and Technology. 2016. Vol. 30 (9). P. 3929–3934. DOI: 10.1007/s12206-016-0804-3.
29. Krupiczka R., Rotkegel A., Ziobrowski Z. Heat transfer to evaporating liquid films within a vertical tube // Chemical Engineering and Processing. 2002. Vol. 41. P. 23–28. DOI: 10.1016/S0255-2701(00)00158-6.
30. Гагапова Е. Я., Филипенко Р. А., Люлин Ю. В. [и др.]. Экспериментальное исследование температурного поля в двухслойной системе жидкость–газ // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 6. С. 729–734.
31. Jabrallah S. Ben, Belghith A., Corriou J. P. Convective heat and mass transfer with evaporation of a falling film in a cavity // International Journal of Thermal Sciences. 2006. Vol. 45. P. 16–28. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2005.05.001.
32. Son G. A level-set method for analysis of microdroplet evaporation on a heated surface // Journal of Mechanical Science and Technology. 2010. Vol. 24 (4). P. 991–997. DOI: 10.1007/s12206-010-0206-x.
33. Misyura S. Y., Morozov V. S. Free convection in a drop at liquid evaporation // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1105. 012044. P. 1–5. DOI: 10.1088/1742-6596/1105/1/012044.
34. 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.
35. Gatapova E. Ya., Semenov A. A., Zaitsev D. V., Kabov O. A. Evaporation of a sessile water drop on a heated surface with controlled wettability // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2014. Vol. 441. P. 776–785.
36. Трушляков В. И., Новиков А. А., Лесняк И. Ю., Паничкин А. В. Исследование процесса тепло- и массообмена в замкнутой ёмкости при различных видах воздействия на жидкость // Проблемы машиноведения: материалы II Междунар. науч.-техн. конф., 27–28 февраля 2018 г. / ОмГТУ. Омск, 2018. С. 130–136.
37. Пат. 2677868 Российская Федерация, МПК G 01 N 33/22, В 64 G 7/00. Способ моделирования процесса тепло- и массообмена при испарении жидкости и устройство для его реализации / Трушляков В. И., Паничкин А. В., Новиков А. А., Лесняк И. Ю., Прусова О. Л. № 2018100952; заявл. 10.01.18; опубл. 22.01.19, Бюл. № 3.
38. Пат. 2170608 Российская Федерация, МПК В 01 D 53/26. Способ осушки внутренних магистралей системы терморегулирования / Коптелов К. А., Курбаков В. В., Цихоцкий В. М. № 99124660/12; заявл. 23.11.99; опубл. 20.07.01, Бюл. № 20.
39. Пат. 2272974 Российская Федерация, МПК F 26 В 5/04. Способ осушки полости трубопроводов и устройство для его осуществления / Губанок И. И., Дубинский В. Г., Егоров И. Ф. [и др.]. № 2004117761/06; заявл. 15.06.04; опубл. 27.03.06, Бюл. № 9.
40. Пат. 2373466 Российская Федерация, МПК F 26 В 7/00, F 26 В 5/04. Способ осушки полости газопровода после гидравлических испытаний / Дубинский В. Г., Антипов Б. Н., Егоров И. Ф. [и др.]. № 2008128751/06; заявл. 14.07.08; опубл. 20.11.09, Бюл. № 32.
41. Пат. 2300062 Российская Федерация, МПК F 26 В 5/04. Способ и устройство осушки газопроводов / Наумейко В. А., Наумейко С. А., Наумейко А. А. № 2005137641/06; заявл. 02.12.05; опубл. 27.05.07, Бюл. № 15.
42. Пат. 2198361 Российская Федерация, МПК F 26 В 7/00, F 26 В 5/04, F 26 В 19/00. Способ осушки полости оборудования и устройство для его осуществления / Егоров И. Ф., Гудков М. М., Сидоренко В. Г. [и др.]. № 2001100073/06; заявл. 04.01.01; опубл. 10.02.03, Бюл. № 4.
43. Пат. 2343379 Российская Федерация, МПК F 26 В 7/00, F 26 В 5/04. Способ осушки полости подводного участка магистрального газопровода после гидравлических испытаний / Дубинский В. Г., Антипов Б. Н., Егоров И. Ф. [и др.]. № 2007142057/06; заявл. 15.11.07; опубл. 10.01.09, Бюл. № 1.
44. Слёзнов В. В., Кутовой В. А., Николайчук Л. И. К теории испарения воды при термовакуумной сушке // Промышленная теплотехника. 2006. Т. 28, № 5. С. 54–58.
45. Trushlyakov V., Panichkin A., Prusova O., Zharikov K., Dron M. Theoretical and experimental researches of the liquid evaporation during thermal vacuum influences // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 944. 012119. P. 1–14. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012119.
46. Трушляков В. И., Паничкин А. В. Оптимизация затрат энергии при термовакуумном испарении жидкости в замкнутом объёме // Проблемы машиноведения: материалы II Междунар. науч.-техн. конф., 27–28 февраля 2018 г. / ОмГТУ. Омск, 2018. С. 311–323.
47. Пат. 2474816 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/02, В 64 G 7/00. 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. № 2010149031/11; заявл. 30.11.10; опубл. 10.02.13, Бюл. № 4.
48. Пат. 2403513 Российская Федерация, МПК F 26 В 3/04, F 26 В 3/20, F 26 В 9/06. Способ осушки длинномерных изделий, преимущественно статоров электродвигателей погружных насосов, и установка для осуществления способа / Расторгуев Д. А., Солдатов А. А., Дорошенко А. Н., Козлов А. В. № 2008150072/06; заявл. 17.12.08; опубл. 10.11.10, Бюл. № 31.
49. Кабов О. А., Кабова Ю. О. Влияние размеров нагревателя на испарение пленки жидкости, увлекаемой потоком газа в микроканале при локальном нагреве // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 4. С. 539–542.
50. Трушляков В. И., Паничкин А. В. Оптимизация затрат энергии при конвективно-кондуктивном нагреве жидкости в цилиндрической емкости // Динамика систем,

механизмов и машин. 2018. Т. 6, № 4. С. 153–163. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-4-153-163.

51. Alla A. N., Feddaoui M., Meftah Hi. Comparison of two configurations to improve heat and mass transfer in evaporating two-component liquid film flow // *International Journal of Thermal Sciences*. 2018. Vol. 126. P. 194–204. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.12.031.

52. Tryshlyakov V. I., Lavruk S. A. Theoretical and experimental investigations of interaction of hot gases with liquid in closed volume // *Acta Astronautica*. 2014. Vol. 109. P. 241–247. DOI: 10.1016/j.actaastro.2014.10.029.

53. Троицкий А. Н. Особенности процесса испарения пленки на поверхности обогреваемой сопловой лопатки в турбинной ступени // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2008. № 5 (55). С. 41–44.

54. Abramzon B., Sazhin S. Convective vaporization of a fuel droplet with thermal radiation absorption // *Fuel*. 2006. Vol. 85. P. 32–46.

55. Лесняк И. Ю. Теоретико-экспериментальные исследования процесса газификации жидкости // *Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической техники и подготовки инженерных кадров для авиакосмической отрасли: материалы VIII Всерос. науч. конф. А. С. Клинышкова, 03–04 октября 2013 г. / ОмГТУ. Омск, 2013. С. 109–113.*

56. Пат. 2493414 Российская Федерация, МПК F 02 K 9/96. Способ моделирования процесса газификации остатков жидкого компонента ракетного топлива в условиях пониженного давления и устройство для его реализации / Трушляков В. И., Куденцов В. Ю., Казаков А. Ю., Курочкин А. С., Лесняк И. Ю. № 2011147900/06; заявл. 24.11.11; опубл. 20.09.13, Бюл. № 26.

ПРУСОВА Ольга Леонидовна, старший преподаватель кафедры «Авиа- и ракетостроение».

SPIN-код: 2313-2053

AuthorID (РИНЦ): 686833

ResearcherID: E-7302-2014

Адрес для переписки: olga.prusova@mail.ru

Для цитирования

Прусова О. Л. Методы испарения жидкости на основе акустико-вакуумного и теплового воздействий (обзор) // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2020. Т. 4, № 1. С. 60–73. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-1-60-73.

Статья поступила в редакцию 21.01.2020 г.

© О. Л. Прусова

METHODS OF LIQUID EVAPORATION ON BASIS OF ACOUSTIC-VACUUM AND THERMAL INFLUENCES (OVERVIEW)

O. L. Prusova

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The basic effects and their combinations on evaporated liquid located on solid surface and in the form of a suspended droplet are analyzed. Methods of applying these effects for liquid evaporation under the following boundary conditions of the liquid location: «drop», «film» are considered. The classification of one-, two-, and three-factor effects on the evaporated liquid is proposed. The direction of further research in the field of joint application of convective, conductive and vacuum influences on the dried object is formulated.

Keywords: liquid evaporation, drop, film, thermal and acoustic-vacuum effect, multi-factor influence, classification of effects on the evaporated liquid.

Acknowledgments

The studies are carried out with financial support from the Russian Ministry of Education and Science within the framework of the state task for subordinate educational institutions, the project «Improving the environmental safety and economic efficiency of launch vehicles with marching liquid rocket engines», task No. 9.1023.2017/ПЧ.

Scientific Supervisor — Doctor of Technical Sciences, Professor V. I. Trushlyakov.

References

1. OST 92-0019-78 Metody i rezhimy sushki izdelij pered ispytaniyami na germetichnost' [Methods and modes of drying products before the tightness tests]. Leningrad, 1979. 80 p. (In Russ.).
2. George O. A., Xiao J., Rodrigo C. S. [et al.]. Detailed numerical analysis of evaporation of a micrometer water droplet suspended on a glass filament // *Chemical Engineering Science*. 2017. Vol. 165. P. 33–47. DOI: 10.1016/j.ces.2017.02.038. (In Engl.).
3. Sazhin S. S. Modelling of fuel droplet heating and evaporation: Recent results and unsolved problems // *Fuel*. 2017. Vol. 196. P. 69–101. (In Engl.).
4. Banerjee R. Numerical investigation of evaporation of a single ethanol/iso-octane droplet // *Fuel*. 2013. Vol. 107. P. 724–739. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.01.003. (In Engl.).
5. Tonini S., Cossali G. E. A novel vaporisation model for a single-component drop in high temperature air streams // *International Journal of Thermal Sciences*. 2014. Vol. 75. P. 194–203. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2013.08.004. (In Engl.).
6. Aktershev S. P., Bartashevich M. V. Semi-analytical method for solving the problem of heating of the liquid film moving under gravity and gas flow // *International Journal of Thermal Sciences*. 2017. Vol. 111. P. 491–498. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2016.06.037. (In Engl.).
7. Nasr A., Al-Ghamdi A. S., Feddaoui M. [et al.]. Numerical study of falling binary liquid film evaporation: liquid film thickness // *Desalination and Water Treatment*.

2017. Vol. 74. P. 35–43. DOI: 10.5004/dwt.2017.20606. (In Engl.).

8. Patent 1830857 SSSR, IPC B 64 G 1/50. Sposob udaleniya teplonosatelya iz sistem termoregulirovaniya kosmicheskikh apparatov [Method for heat carrier removing from spacecraft thermal control systems] / Tsihotskiy V. M. No. 4508100/23. (In Russ.).

9. Patent 2307774 Russian Federation, IPC B 64 G 1/50. Sposob udaleniya iz gidromagistralej neslivayemykh ostatkov teplonosatelya [Method for removing non-spillable residues of heat carrier from hydraulic lines] / Bezrukikh A. D. No. 2005132043/11. (In Russ.).

10. Patent 2350860 Russian Federation, IPC F 26 B 5/04. Ustanovka dlya osushki gazoprovoda [Apparatus for drying the gas pipeline] / Gofman M. S., Lovtsov A. V., Deynezhenko V. I. No. 2007139466/06. (In Russ.).

11. Patent 2403517 Russian Federation, IPC F 26 B 20/00, F 26 B 5/04. Ustanovka dlya osushki gazoprovoda [Apparatus for drying the gas pipeline] / Gofman M. S. No. 2009122585/06. (In Russ.).

12. Kudryavtsev D. A. Metody sovershenstvovaniya tekhnologii vakuumnoy osushki gazoprovodov [Methods for improving the technology of vacuum drying of gas pipelines]. Moscow, 2013. 25 p. (In Russ.).

13. Patent 2599302 Russian Federation, IPC B 08 B 3/12. Sposob ul'trazvukovoy ochistki i sushki vnutrennikh poverkhnostey toplivnykh bakov [Method of ultrasonic cleaning and drying of internal surfaces of fuel tanks] / Velts Ya. Ya., Velts I. Ya., Velts N. I., Velts A. Ya. No. 2015138691/05. (In Russ.).

14. Patent 2460953 Russian Federation, IPC F 26 B 3/02, F 26 B 7/00, F 26 B 9/10. Ustanovka dlya sushki trub i sposob sushki [Apparatus for drying pipes and the drying method] / Artemkin A. A., Kolmakov A. V. No. 2011114724/06. (In Russ.).

15. Li J., Zhang J. A theoretical study of the spheroidal droplet evaporation in forced convection // *Physics Letters A*. 2014. Vol. 378 (47). P. 3537–3543. DOI: 10.1016/j.physleta.2014.10.020. (In Engl.).

16. Shalay V. V., Trushlyakov V. I., Kudentsov V. Yu. Modelirovaniye nachal'nogo perioda funktsionirovaniya

sistemy gazifikatsii zhidkikh ostatkov topliva [Modeling the initial period of functioning of gasification system of liquid rocket fuel] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2015. No. 1 (137). P. 15–19. (In Russ.).

17. Trushlyakov V. I., Lesnyak I. Yu., Galfetti L. An experimental investigation of convective heat transfer at evaporation of kerosene and water in the closed volume // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2017. Vol. 24, no. 5. P. 771–781. DOI: 10.1134/S0869864317050109. (In Engl.).

18. Trushlyakov V. I., Lesnyak I. Yu., Gal'fetti L. Eksperimental'nyye issledovaniya protsessa konvektivnogo teploobmena pri isparenii kerosina i vody v zamknutom ob'yeme [An experimental investigation of convective heat transfer at evaporation of kerosene and water in the closed volume] // *Teplofizika i aeromekhanika. Thermophysics and Aeromechanics*. 2017. Vol. 24, no. 5 (107). P. 771–781. (In Russ.).

19. Trushlyakov V. I., Kudentsov V. Yu., Lesnyak I. Yu., Rozhaeva K. A., Lavruk S. A., Dron' M. M., Zharikov K. I. Evaporation of a Model Liquid // *Russian Engineering Research*. 2017. Vol. 37, no. 1. P. 1–4. DOI: 10.3103/S1068798X17010221. (In Engl.).

20. Patent 2461890 Russian Federation, IPC G 09 B 23/00. Sposob modelirovaniya protsessa gazifikatsii ostatkov zhidkogo raketnogo topliva v bakah otdelayushcheyasya chasti stupeni rakety-nositelya i ustroystvo dlya ego realizatsii [A method for modeling the gasification process of liquid rocket fuel residues in the tanks of the separating part of the launch vehicle stage and a device for its implementation] / Trushlyakov V. I., Kudentsov V. Yu., Kazakov A. Yu., Kurochkin A. S., Lesnyak I. Yu., Polunin M. V. No. 2010141530/12. (In Russ.).

21. Patent 2637140 Russian Federation, IPC G 01 N 33/22. Sposob modelirovaniya protsessa gazifikatsii ostatkov zhidkogo komponenta raketnogo topliva i ustroystvo dlya ego realizatsii [Method for modeling the gasification process of the residual liquid component of rocket fuel and device for its implementation] / Trushlyakov V. I., Dron' M. M., Sevoyan V. A. No. 2016111899. (In Russ.).

22. Voronov A. Yu., Bal'chugov A. V., Ul'yanov B. A. [et al.]. Statisticheskaya obrabotka rezul'tatov issledovaniya massoobmennykh protsessov ispareniya vody v potok vozdukh s gorizontal'noy svobodnoy poverkhnosti [Statistical processing of the results of the study of mass transfer processes of water evaporation into the air stream from a horizontal free surface] // *Sovremennyye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskiy progress. Modern Technologies and Scientific and Technical Progress*. 2004. Vol. 1. P. 36–38. (In Russ.).

23. Terekhov V. I., Terekhov V. V., Shishkin N. E., Bi K. Ch. Eksperimental'noye i chislennoye issledovaniya nestatsionarnogo ispareniya kapel' zhidkosti [Heat and mass transfer in disperse and porous media experimental and numerical investigations of nonstationary evaporation of liquid droplets] // *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal. Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2010. Vol. 83, no. 5. P. 829–836. (In Russ.).

24. Navaz H. K., Chan E., Markicevic B. Convective evaporation model of sessile droplets in a turbulent flow — comparison with wind tunnel data // *International Journal of Thermal Sciences*. 2008. Vol. 47. P. 963–971. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2007.08.004. (In Engl.).

25. Wu Y., Zhang X., Zhang X. Simplified analysis of heat and mass transfer model in droplet evaporation process // *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 99. P. 938–943. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.020. (In Engl.).

26. Wang F., Yang S., Yao J. [et al.]. A new stationary droplet evaporation model and its validation // *Chinese*

Journal of Aeronautics. 2017. Vol. 30, Issue 4. P. 1407–1416. DOI: 10.1016/j.cja.2017.06.012. (In Engl.).

27. Ahn H., Son G. Numerical simulation of liquid film evaporation in circular and square microcavities // *Numerical Heat Transfer. Part A*. 2015. Vol. 67. P. 934–951. DOI: 10.1080/10407782.2014.949153. (In Engl.).

28. Hwang H., Son G. Direct numerical simulation of 3D particle motion in an evaporating liquid film // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2016. Vol. 30 (9). P. 3929–3934. DOI: 10.1007/s12206-016-0804-3. (In Engl.).

29. Krupiczka R., Rotkegel A., Ziobrowski Z. Heat transfer to evaporating liquid films within a vertical tube // *Chemical Engineering and Processing*. 2002. Vol. 41. P. 23–28. DOI: 10.1016/S0255-2701(00)00158-6. (In Engl.).

30. Gatapova E. Ya., Filipenko R. A., Lyulin Yu. V. [et al.]. Eksperimental'noye issledovaniye temperaturnogo polya v dvukhsloynoy sisteme zhidkost' – gaz [Experimental investigation of the temperature field in the gas–liquid two-layer system] // *Teplofizika i aeromekhanika. Thermophysics and Aeromechanics*. 2015. Vol. 22, no. 6. P. 729–734. (In Russ.).

31. Jabrallah S. Ben, Belghith A., Corriou J. P. Convective heat and mass transfer with evaporation of a falling film in a cavity // *International Journal of Thermal Sciences*. 2006. Vol. 45. P. 16–28. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2005.05.001. (In Engl.).

32. Son G. A level-set method for analysis of microdroplet evaporation on a heated surface // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2010. Vol. 24 (4). P. 991–997. DOI: 10.1007/s12206-010-0206-x. (In Engl.).

33. Misyura S. Y., Morozov V. S. Free convection in a drop at liquid evaporation // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2018. Vol. 1105. 012044. P. 1–5. DOI: 10.1088/1742-6596/1105/1/012044. (In Engl.).

34. Semenov A. A., Feoktistov D. V., Zaytsev D. V., Kuznetsov G. V., Kabov O. A. Eksperimental'noye issledovaniye ispareniya kapli zhidkosti na nagrevayemoy tverdoy poverkhnosti [Experimental investigation of liquid drop evaporation on a heated solid surface] // *Teplofizika i aeromekhanika. Thermophysics and Aeromechanics*. 2015. Vol. 22, no. 6. P. 801–804. (In Russ.).

35. Gatapova E. Ya., Semenov A. A., Zaitsev D. V., Kabov O. A. Evaporation of a sessile water drop on a heated surface with controlled wettability // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2014. Vol. 441. P. 776–785. (In Engl.).

36. Trushlyakov V. I., Novikov A. A., Lesnyak I. Yu., Panichkin A. V. Issledovaniye protsessa teplo- i massoobmena v zamknutoy emkosti pri razlichnykh vidakh vozdeystviya na zhidkost' [Investigation of the heat and mass transfer process in a closed tank under various types of influence on the liquid] // *Problemy mashinovedeniya. Problemy Mashinovedeniya*. Omsk, 2018. P. 130–136. (In Russ.).

37. Patent 2677868 Russian Federation, IPC G 01 N 33/22, B 64 G 7/00. Sposob modelirovaniya protsessa teplo- i massoobmena pri isparenii zhidkosti i ustroystvo dlya ego realizatsii [Method for modeling the process of heat and mass transfer with liquid evaporation and device for its implementation] / Trushlyakov V. I., Panichkin A. V., Novikov A. A., Lesnyak I. Yu., Prusova O. L. No. 2018100952. (In Russ.).

38. Patent 2170608 Russian Federation, IPC B 01 D 53/26. Sposob osushki vnutrennikh magistraley sistemy termoregulirovaniya [Drying method of the internal highways of the thermal control system] / Koptelov K. A., Kurbakov V. V., Tsikhotskiy V. M. No. 99124660/12. (In Russ.).

39. Patent 2272974 Russian Federation, IPC F 26 B 5/04. Sposob osushki polosti truboprovodov i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [Drying method of the pipeline cavity and device for its implementation] / Gubanok I. I., Dubinskiy V. G., Egorov I. F. [et al.]. No. 2004117761/06. (In Russ.).
40. Patent 2373466 Russian Federation, IPC F 26 B 7/00, F 26 B 5/04. Sposob osushki polosti gazoprovoda posle gidravlicheskih ispytaniy [Drying method of the pipeline cavity after hydraulic test] / Dubinskiy V. G., Antipov B. N., Egorov I. F. [et al.]. No. 2008128751/06. (In Russ.).
41. Patent 2300062 Russian Federation, IPC F 26 B 5/04. Sposob i ustroystvo osushki gazoprovodov [Method and device for drying gas pipelines] / Naumeyko V. A., Naumeyko S. A., Naumeyko A. A. No. 2005137641/06. (In Russ.).
42. Patent 2198361 Russian Federation, IPC F 26 B 7/00, F 26 B 5/04, F 26 B 19/00. Sposob osushki polosti oborudovaniya i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [Drying method of the equipment cavity and device for its implementation] / Egorov I. F., Gudkov M. M., Sidorenko V. G. [et al.]. No. 2001100073/06. (In Russ.).
43. Patent 2343379 Russian Federation, IPC F 26 B 7/00, F 26 B 5/04. Sposob osushki polosti podvodnogo uchastka magistral'nogo gazoprovoda posle gidravlicheskih ispytaniy [Drying method of the cavity of the underwater cavity gas pipeline after hydraulic test] / Dubinskiy V. G., Antipov B. N., Egorov I. F. [et al.]. No. 2007142057/06. (In Russ.).
44. Sleznov V. V., Kutovoy V. A., Nikolaychuk L. I. K teorii ispareniya vody pri termovakuumnoy sushke [To the theory of the water evaporation at thermovacuum drying] // *Promyshlennaya teplotekhnika. Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2006. Vol. 28, no. 5. P. 54–58. (In Russ.).
45. Trushlyakov V., Panichkin A., Prusova O., Zharikov K., Dron M. Theoretical and experimental researches of the liquid evaporation during thermal vacuum influences // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 944. 012119. P. 1–14. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012119. (In Engl.).
46. Trushlyakov V. I., Panichkin A. V. Optimizatsiya zatrat energii pri termovakuumnom isparenii zhidkosti v zamknutom ob"yeme [Optimization of energy spending for thermal vacuum evaporation of a liquid in a closed tank] // *Problemy mashinovedeniya. Problemy Mashinovedeniya*. Omsk, 2018. P. 311–323. (In Russ.).
47. Patent 2474816 Russian Federation, IPC G 01 N 29/02, B 64 G 7/00. Sposob modelirovaniya protsessa gazifikatsii ostatkov zhidkogo raketnogo topliva i ustroystvo dlya ego realizatsii / [Modeling method of the gasification process of liquid rocket fuel residues and device for its implementation] / Trushlyakov V. I., Kudentsov V. Yu., Kazakov A. Yu., Kurochkin A. S., Lesnyak I. Yu. No. 2010149031/11. (In Russ.).
48. Patent 2403513 Russian Federation, IPC F 26 B 3/04, F 26 B 3/20, F 26 B 9/06. Sposob osushki dlinnomernykh izdeliy, preimushchestvenno statorov elektrodvigateley pogruzhnykh nasosov, i ustanovka dlya osushchestvleniya sposoba [Drying method of long products, mainly electric motors stators of submersible pumps, and an apparatus for implementing the method] / Rastorguyev D. A., Soldatov A. A., Doroshenko A. N., Kozlov A. V. No. 2008150072/06. (In Russ.).
49. Kabov O. A., Kabova Yu. O. Vliyaniye razmerov nagrevatelya na ispareniye plenki zhidkosti, vlekayemoy potokom gaza v mikrokanale pri lokal'nom nagreve [Effect of heater sizes on evaporation of a liquid film entrained by the gas flow in a microchannel with local heating] // *Teplofizika i aeromekhanika. Thermophysics and Aeromechanics*. 2015. Vol. 22, no. 4. P. 539–542. (In Russ.).
50. Trushlyakov V. I., Panichkin A. V. Optimizatsiya zatrat energii pri konvektivno-konduktivnom nagreve zhidkosti v tsilindricheskey emkosti [Optimization of energy consumption for convective-conductive heating of a liquid in a cylindrical tank] // *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2018. Vol. 6, no. 4. P. 153–163. (In Russ.).
51. Alla A. N., Feddaoui M., Meftah Hi. Comparison of two configurations to improve heat and mass transfer in evaporating two-component liquid film flow // *International Journal of Thermal Sciences*. 2018. Vol. 126. P. 194–204. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.12.031. (In Engl.).
52. Tryshlyakov V. I., Lavruk S. A. Theoretical and experimental investigations of interaction of hot gases with liquid in closed volume // *Acta Astronautica*. 2014. Vol. 109. P. 241–247. DOI: 10.1016/j.actaastro.2014.10.029. (In Engl.).
53. Troitskiy A. N. Osobennosti protsessy ispareniya plenki na poverkhnosti obogrevayemoy soplovyoy lopatki v turbinnoy stupeni [Features of the film evaporation process on the surface of the heated nozzle blade in the turbine stage] // *Energoberezhenie i vodopodgotovka. Energoberezhenie i Vodopodgotovka*. 2008. No. 5 (55). P. 41–44. (In Russ.).
54. Abramzon B., Sazhin S. Convective vaporization of a fuel droplet with thermal radiation absorption // *Fuel*. 2006. Vol. 85. P. 32–46. (In Engl.).
55. Lesnyak I. Yu. Teoretiko-eksperimental'nyye issledovaniya protsessy gazifikatsii zhidkosti [Theoretical and experimental studies of the liquid gasification process] // *Problemy razrabotki, izgotovleniya i ekspluatatsii raketno-kosmicheskoy tekhniki i podgotovki inzhenernykh kadrov dlya aviakosmicheskoy otrasli. Problemy Razrabotki, Izgotovleniya i Ekspluatatsii Raketno-Kosmicheskoy Tekhniki i Podgotovki Inzhenernykh Kadrov dlya Aviakosmicheskoy Otrashi*. Omsk, 2013. P. 109–113. (In Russ.).
56. Patent 2493414 Russian Federation, IPC F 02 K 9/96. Sposob modelirovaniya protsessy gazifikatsii ostatkov zhidkogo komponenta raketnogo topliva v usloviyakh ponizhennogo davleniya i ustroystvo dlya ego realizatsii [Modeling method of the gasification process of the residual liquid component of rocket fuel under low pressure conditions and device for its implementation] / Trushlyakov V. I., Kudentsov V. Yu., Kazakov A. Yu., Kurochkin A. S., Lesnyak I. Yu. No. 2011147900/06. (In Russ.).

PRUSOVA Olga Leonidovna, Senior Lecturer of Aviation and Rocketry Department.

SPIN-code: 2313-2053

AuthorID (RSCI): 686833

ResearcherID: E-7302-2014

Address for correspondence: olga.prusova@mail.ru

For citations

Prusova O. L. Methods of liquid evaporation on basis of acoustic-vacuum and thermal effects (overview) // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2020. Vol. 4, no. 1. P. 60–73. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-1-60-73.

Received January 21, 2020.

© O. L. Prusova