

# ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА ОБРАЗОВАНИЕ КАПЕЛЬ С ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНКИ ЖИДКОГО КЕРОСИНА ПРИ ЕГО ИСПАРЕНИИ В БАКЕ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

В. И. Трушляков<sup>1</sup>, В. Ю. Куденцов<sup>1</sup>, А. К. Буряк<sup>2</sup>, Д. Д. Матюшин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный технический университет,  
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

<sup>2</sup>Институт физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина РАН,  
Россия, 119071, г. Москва, Ленинский пр., 31, корп. 4

Представлены результаты экспериментального исследования влияния поверхностно-активного вещества (ПАВ) на теплофизические параметры жидкого керосина по определению коэффициента поверхностного натяжения, вязкости с учетом введенных ПАВ для различной степени концентрации. Рассмотрено влияние ПАВ на интенсивность уноса капель со свободной поверхности. Полученные результаты показывают перспективность введения ПАВ в топливные баки ракеты-носителя (РН) для повышения интенсивности процесса испарения керосина для решения задач осушки (при изготовлении баков) и извлечения энергетических ресурсов, находящихся в неиспользуемых остатках топлива после выключения маршевого ЖРД.

**Ключевые слова:** испарение, жидкие остатки керосина, топливный бак ракеты-носителя, поверхностно-активные вещества.

## Введение

Повышение эффективности испарения жидкостей в замкнутых объемах является актуальной задачей для многих технологических процессов, в том числе при:

— производстве РН с ЖРД (осушка топливных баков и магистралей после ряда технологических операций, связанных с заполнением их технологическими жидкостями для мытья, тарировки, гидравлических испытаний и т.д.);

— эксплуатации РН после выключения маршевого ЖРД для обеспечения взрывобезопасности топливных баков, извлечения неиспользуемых энергетических ресурсов, находящихся в жидких остатках топлива в баках РН.

В работе [1] была разработана математическая модель конвективного процесса испарения жидких остатков керосина в баке при условии о равномерности покрытия внутренней поверхности топливного бака. Для описания начальных параметров процесса было проведено математическое моделирование начального момента испарения. Результаты исследования [2] показали, что через 10–14 с после начала процесса подачи горячих газов (теплоносителя) в бак газокапельная фаза остатков керосина выходит на стационарный режим, при котором жидкие остатки керосина распределены по внутренней поверхности емкости.

В условиях ограничения времени на процесс испарения важной задачей является интенсификация процесса испарения. Увеличение температуры подаваемого в объем бака теплоносителя не решает данную задачу, т.к. существуют ограничения по температурно-прочностному нагружению конструкции бака. Одним из возможных подходов является использование ПАВ, вводимых в керосин.

Характерной особенностью ПАВ является наличие в молекуле сильнополярных или заряженных фрагментов, с одной стороны, и длинного (содержащего множество атомов) неполярного фрагмента. Благодаря такой структуре, ПАВ способны образовывать молекулярные слои на границах раздела фаз и существенно влиять на поверхностное натяжение [3]. Как показано в работах [4, 5], уменьшение поверхностного натяжения влияет на процесс образования капель жидкости. Добавление ПАВ в концентрации 0,01–0,05 % (масс.) уменьшает размер образующейся капли в 1,5–2 раза. Это приводит к увеличению площади капли в 2–4 раза, что в конечном итоге влияет на интенсификацию тепло- и массообмена.

Однако наряду с работой [6], показывающей положительную динамику процесса испарения, существуют работы, например [7], в которых приведены результаты теоретико-экспериментальных исследований, свидетельствующих о снижении скорости испарения жидкости с введенной ПАВ по сравнению с «чистым» образцом. На скорость испарения жидкости существенное влияние оказывает состав и концентрация ПАВ. Например, в работах [8, 9] показано, что ПАВ на основе полидиметилсилоксана и его сополимеров с различными материалами активны, будучи растворенными в углеводородных топливах, способны стабилизировать эмульсии в таких жидкостях, влиять на их поверхностное натяжение.

Изменение физических параметров жидкостей с введенным ПАВ и, в первую очередь, изменение поверхностного натяжения влияет на поведение границы раздела теплообмена. В процессе испарения керосина уменьшается толщина жидкости, изменяются параметры волн, образующихся на поверхности теплообмена, изменяется количес-

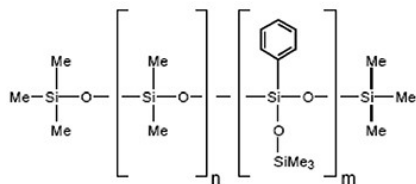


Рис. 1. Структурная формула ПАВ  
Fig. 1. Structural formula of surfactants

тво массы срываемого керосина с возникающих волн [4, 5].

Вместе с тем в научной литературе крайне мало имеется результатов экспериментальных исследований по влиянию ПАВ на свойства ракетного керосина, в частности — РГ-1.

### Постановка задачи

Таким образом, постановку задачи исследования повышения интенсивности процессов тепло- и массообмена остатков керосина в баке ОЧ ступени РН можно сформулировать следующим образом:

- обоснование выбора ПАВ на основе полидиметилсилоксана для его возможного использования в качестве добавки в керосин;
- получение экспериментальных данных по влиянию заданных ПАВ на поверхностное натяжение керосина с различной массовой концентрацией ПАВ;
- проведение оценок по влиянию вводимой добавки ПАВ на механизм образования капель с поверхности пленки жидкого керосина РГ-1 при обдувании газовым потоком.

### Экспериментальные исследования

Обоснование выбора ПАВ для проведения экспериментов. При выборе ПАВ, предполагаемого к использованию его в составе жидкого керосина, необходимо руководствоваться следующими специфическими требованиями.

ПАВ должно быть растворимо в керосине, которое представляет собой неполярную углеводородную жидкость, обладать достаточным сродством к поверхности алюминиевых сплавов, покрытой гидрофильным слоем оксидов металлов. Кроме того, оно должно обладать достаточной термической стабильностью (не разлагаться при температурах свыше 300 °С). Всеми вышеперечисленными свойствами обладают ПАВ на основе фенилзамещенных

полидиметилсилоксанов. Данные соединения термически стабильны при температурах до 450 °С [10].

В качестве модельного ПАВ в данной работе предлагается использовать промышленно выпускаемый ПАВ марки «Belsil PDM 20» [8] на базе фенилзамещенного полидиметилсилоксана. Данное ПАВ коммерчески доступно и выпускается фирмой Wacker. Физико-химические свойства данного ПАВ при (25 °С) следующие [9, 10]: агрегатное состояние — вязкая бесцветная жидкость; плотность — около 1000 кг/м<sup>3</sup>; коэффициент кинематической вязкости — 20·10<sup>-6</sup> м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>; теплота испарения — около 1 МДж/кг.

Дополнительным преимуществом выбора ПАВ данного типа является то, что само ПАВ и продукты его термической деструкции малотоксичны или нетоксичны.

На рис. 1 приведена структурная формула данного вещества.

Как видно из структурной формулы данного соединения, его молекулы содержат как чрезвычайно липофильные триметилсилановые фрагменты (обеспечивающие его растворимость в керосине), так и фенильные группы, обладающие сродством к апротонным полярным соединениям — в том числе к поверхности топливного бака.

Необходимо подчеркнуть, что свойства ПАВ сильно зависят от длины полимерной цепочки и соотношения сополимеров и коммерчески доступные ПАВ не всегда имеют достаточно унифицированные (воспроизводимые) свойства, такие как соотношение компонентов сополимера и молекулярная масса.

В этой связи представляется целесообразным проведение исследований доступных образцов ПАВ на предмет характеристики (входного контроля) химического состава и его структуры. Для практического использования таких ПАВ необходимо иметь метод характеристики имеющихся образцов. Одним из подходящих методов измерения параметров полимерных ПАВ является масс-спектрометрия. Для предварительной оценки свойств имеющихся образцов ПАВ «Belsil PDM 20» фирмы Wacker было проведено их исследование методом масс-спектрометрии с матрично-активированной лазерной десорбцией-ионизацией (МАЛДИ-МС). Данный метод успешно позволяет ионизировать молекулы ПАВ с образованием некоторого количества фрагментных ионов. Массы полученных ионов позволяют рассчитать параметры исходного вещества.

Полученный масс-спектр показан на рис. 2.

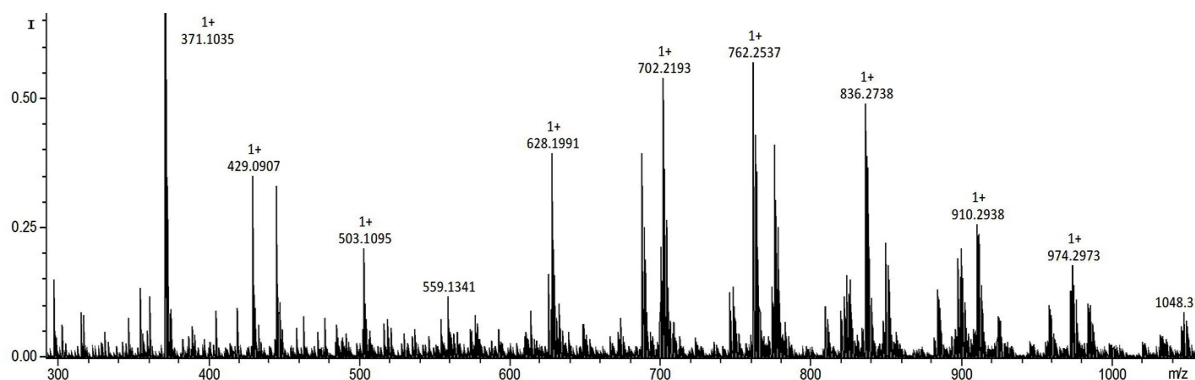


Рис. 2. Масс-спектр ПАВ «Belsil PDM 20»  
Fig. 2. Mass spectrum of surfactants «Belsil PDM 20»

## Влияние ПАВ на каплеобразование с поверхности пленки керосина.

### Унос капель с поверхности раздела «газ – жидкость»

Результаты, приведенные на рис. 2, показывают, что атомная масса ПАВ находится в пределах 600–900 Да<sup>1</sup>, что соответствует степени полимеризации  $n + m = 8 - 12$ . Разница между соседними группами пиков составляет 74 Да, что соответствует фрагменту диметилсилоксана (-O-Si(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-O-). Разница в массах ближайших пиков из двух последовательностей составляет 14 Да (соответствует фрагменту CH<sub>2</sub>). Также наблюдаются серии пиков, отстоящие друг от друга на 62 Да, что соответствует замене CH<sub>3</sub>-группы на C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>- и позволяет оценить концентрацию фенильных остатков в сополимере. Для данного образца она составляет 20 ± 4 %.

Таким образом, продемонстрирована эффективность применения метода МАЛДИ-МС для характеристики образцов ПАВ и изучения их химической структуры.

*Влияние ПАВ на поверхностное натяжения керосина.* Для определения коэффициента поверхностного натяжения керосина с учётом введенной добавки на основе ПАВ для различной степени концентрации проведен физический эксперимент. В качестве ПАВ был использован образец «Belsil PDM 20» фирмы Wacker, в качестве жидкости — керосин.

Эксперимент проводился на основе сталагмометрического метода путем измерения массы отрывающихся капель при вытекании через тонкое отверстие радиусом около 1 мм. Количество экспериментов с различной массовой концентрацией ПАВ в керосине было выбрано таким образом, чтобы можно было аппроксимировать результаты эксперимента степенной функцией с приемлемой точностью ( $R^2 > 0,9$ ).

На рис. 3 представлен график результатов эксперимента.

Как следует из результатов экспериментальных исследований, нахождение ПАВ в керосине с содержанием 0,1 % (масс.) приводит к резкому уменьшению коэффициента поверхностного натяжения на 16 %, дальнейшее повышение концентрации ПАВ в керосине до 1 % (масс.) ведет к уменьшению коэффициента на 35 % от первоначального значения.

Для расчетного определения коэффициента поверхностного натяжения керосина с введенной ПАВ (масс.) предложена следующая зависимость:

$$\sigma_{кер}^{ПАВ} = \sigma_{кер} (1 - 0,383 C_{ПАВ}^{0,297}), \quad (1)$$

где  $\sigma_{кер}$  — коэффициент поверхностного натяжения керосина (РГ-1) без введенной добавки ПАВ при нормальных условиях;  $C_{ПАВ}$  — массовая доля содержания ПАВ в керосине, %.

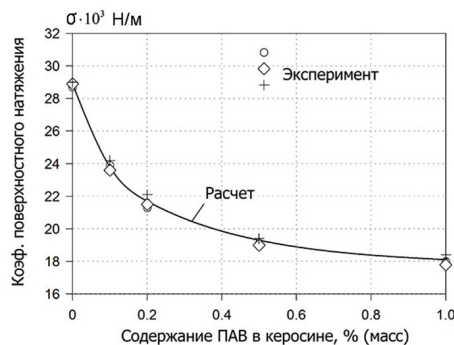


Рис. 3. График коэффициента поверхностного натяжения керосина с введенной добавкой ПАВ

Fig. 3. Graph of the surface tension of kerosene introduced with the additive surfactant

В настоящее время существует достаточное количество работ, направленных на описание механизма срыва капель с поверхности жидкости при обтекании её потоком газа. Унос капель с поверхности раздела «газ – жидкость» определяется результирующей взаимодействия сил инерции, вязкости, поверхностного натяжения и динамического взаимодействия газового потока. В работе [11] представлены схемы срыва капель с гребней волн, образующихся на поверхности жидкости при обтекании её потоком газа для различных условий.

В работах [12–20] представлены различные расчетные зависимости по определению параметров жидкости, срываемых с поверхности раздела «жидкость – газ» при обдуве газовым потоком.

Однако большинство полученных расчетных зависимостей не позволяет в полной мере провести исследования по влиянию вводимого ПАВ на процесс срыва капель с поверхности жидкости. Наиболее целесообразным в плане исследования механизма каплеобразования на поверхности жидкости является использование приближенной модели, представленной в работе [20].

Одним из основных параметров, влияющих на срыв капель с поверхности жидкости, является критическая скорость газа в пристеночной области топливного бака.

Критическая скорость газового потока, при которой происходит срыв капель жидкости, определяется по следующему соотношению [19]:

$$w_{ocr} = C_0 \frac{\sigma_{кер}^{ПАВ}}{(v_{кер} P_L \rho_r)^{1/2}} \left[ 1 + C_1 \left( \frac{P_L}{\mu_{кер}} \right)^{1/2} \cdot \frac{\rho_r}{\rho_{кер}} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где  $v_{кер}$ ,  $\mu_{кер}$ ,  $\rho_{кер}$  — соответственно коэффициенты кинематической и динамической вязкости, плотность жидкого КРТ;  $\rho_r$  — плотность газовой фазы внутри топливного бака;  $C_0$ ,  $C_1$  — константы.

Массовый расход керосина в пленке при его движении по стенке топливного бака определяется по следующему выражению:

$$P_L = \rho_{кер} \cdot w_{кер} \cdot \delta_{кер}, \quad (3)$$

где  $w_{кер}$ ,  $\delta_{кер}$  — соответственно скорость движения и толщина пленки керосина на стенке топливного бака.

На основе сравнения теоретических [20] и экспериментальных значений [21] предложены следующие значения коэффициентов [21]:  $C_0 = 0,05$ ;  $C_1 = 6$ .

Поток массы срывающихся капель с поверхности жидкой пленки керосина при обдуве газовым потоком определяется по следующей зависимости [21]:

$$E_{кан} = 4,5 \cdot 10^{-4} \left( \frac{\xi \rho_{кер}}{8 \sigma_{кер}^{ПАВ} D_b} \right)^{1/2} \cdot P_L w_r, \quad (4)$$

где  $D_b$  — диаметр топливного бака;  $\xi$  — коэффициент гидравлического сопротивления поверхности пленки керосина, определяемый по формуле Филоненко:

$$\xi = (1,82 \lg Re_L - 1,64)^{-2}. \quad (5)$$

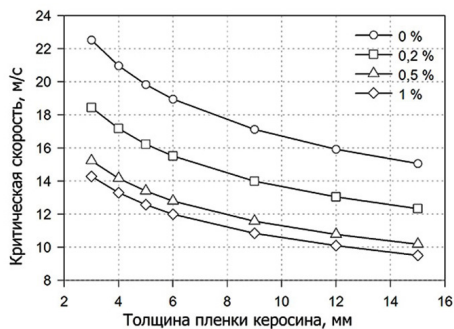


Рис. 4. График величины критической скорости, при которой происходит срыв капель с поверхности керосина  
Fig. 4. Graph of magnitude of the critical velocity at which the droplets break with the surface of kerosene

Число Рейнольдса пленки определяется по следующей зависимости:

$$Re_L = 4P_L / \mu_{кер} \cdot \quad (6)$$

Масса жидкости, срываемая в виде капелек с поверхности пленки жидкости, определяется по формуле:

$$M_{кан} = E_{кан} F_{мб} \quad (7)$$

где  $F_{мб}$  — площадь внутренней поверхности топливного бака, смоченного керосином.

Текущая масса остатков керосина в ёмкости:

$$M_{\Sigma кер} = F_{мб} \delta_{кер} \rho_{кер} \cdot \quad (8)$$

С учетом зависимостей (7)–(8) доля массы капелек, срываемая с поверхности пленки керосина, отнесенная к текущей массе КРТ:

$$\epsilon_{кан} = M_{кан} / M_{\Sigma кер} \cdot \quad (9)$$

На рис. 4 представлен график величины критической скорости (2), при которой происходит срыв капелек с поверхности керосина для различной толщины пленки жидкого компонента на стенке топливного бака в зависимости от введенного ПАВ. Согласно результатам моделирования полей скоростей течения газовой фазы в объеме топливных баков [1], средняя скорость в приповерхностном слое около керосина составляет: для баков первых ступеней — 6–8 м/с; для вторых — 25–40 м/с.

На рис. 5 представлен график потока массы (4) срываемых с поверхности керосина капелек в зависимости от введенного ПАВ. Отмечается, что для различных значений концентрации ПАВ в керосине с изменением толщины пленки с 15 мм до 3 мм поток массы  $E_{кан}$  уменьшается на 45 % от первоначального значения. Это связано с уменьшением высоты волн, образующихся на пленке жидкости. Увеличение ПАВ до 1 % (масс.) приводит к увеличению потока массы  $E_{кан}$  на 25 %.

На рис. 6 представлен график доли массы капелек, срываемой с поверхности пленки керосина, отнесенная к текущей массе остатков КРТ в топливном баке в зависимости от введенного ПАВ (9). С изменением толщины пленки с 15 мм до 3 мм доля массы  $\epsilon_{кан}$  увеличивается в 2,8 раза, от 0,058 % до 0,163 %. Увеличение ПАВ до 1 % (масс.) приводит к увеличению доли массы  $\epsilon_{кан}$  на 25 %.

Таким образом, представляется перспективным введение ПАВ в топливные баки ступеней РН в процессе их осушки с применением теплоносителей для повышения эффективности процесса.

### Обсуждение полученных результатов

1. В части обоснования выбора ПАВ на основе полидиметилсилоксана для его возможного использования в качестве добавки в керосин получено:

— в качестве вводимой добавки в керосин РГ-1 предпочтительным является ПАВ на основе полидиметилсилоксана и его сополимеров;

— применение ПАВ к криогенным топливам (например, к жидкому кислороду) представляется затруднительным ввиду отсутствия ПАВ, активных при настолько низких температурах. Большинство растворимых в неполярных жидкостях ПАВ представляют собой полимерные соединения, утрачивающие конформационную подвижность при низких температурах.

2. В части получения экспериментальных данных по влиянию заданных ПАВ на поверхностное натяжение керосина с различной массовой концентрацией ПАВ:

— на основе стагмометрического метода были получены экспериментальные значения коэффициента поверхностного натяжения керосина с введенным ПАВ на основе полидиметилсилоксана и его сополимеров;

— для расчетного определения коэффициента поверхностного натяжения керосина с введенным ПАВ (масс.) предложена расчетная зависимость.

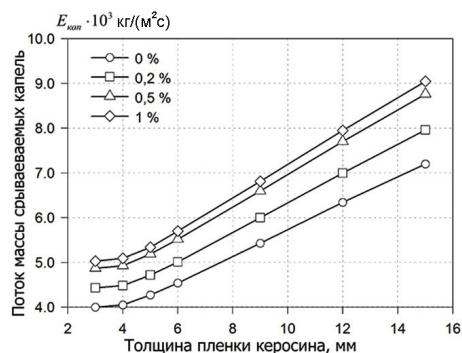


Рис. 5. График потока массы срываемых с поверхности керосина капелек  
Fig. 5. Graph of mass flow tear away from the surface of the kerosene drops

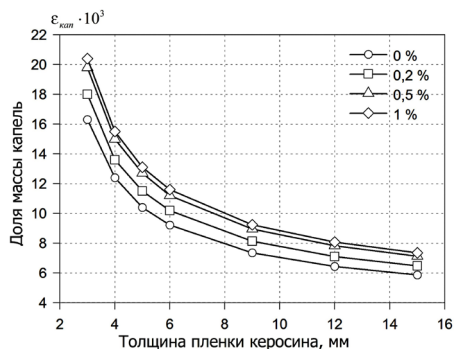


Рис. 6. График доли массы капелек, срываемой с поверхности пленки керосина  
Fig. 6. Graph of the fraction of the mass of droplets, the tearing from surface of the kerosene film

3. В части проведения оценок по влиянию вводимой добавки ПАВ на механизм образования капель с поверхности пленки жидкого керосина РГ-1 при обдувании газовым потоком получены следующие результаты.

— критическая скорость срыва капель зависит от толщины жидкой пленки керосина, с уменьшением толщины пленки керосина скорость срыва капель возрастает;

— введение ПАВ с массовым содержанием 0,2 % уменьшает критическую скорость срыва капель на 18–22 %, дальнейшее повышение концентрации ПАВ в керосине до 1 % ведет к уменьшению критической скорости срыва капель на 60–65 % от первоначального значения;

— для топливных баков первых ступеней РН скорость течения газовой фазы в пристеночной области меньше критической скорости срыва капель даже при условии введенного ПАВ с массовой долей 1 %;

— для топливных баков вторых и последующих ступеней РН критическая скорость срыва капель меньше скорости газовой фазы в пристеночном слое для большего времени процесса испарения. Только при уменьшении толщины слоя жидкости менее 2 мм скорость срыва становится больше средней скорости движения газовой фазы в пристеночной области, что затрудняет каплеобразование с поверхности раздела фаз.

### Выводы

1. В качестве вводимой добавки в керосин РГ-1 предпочтительным является ПАВ на основе полидиметилсилоксана и его сополимеров.

2. Установлено, что введение ПАВ в керосин (до 0,5 % масс.) приводит к интенсификации каплеобразования с поверхности пленки жидкости.

3. Использование ПАВ при осуществлении испарения жидкого остатка керосина на основе конвективного метода целесообразно только для топливных баков вторых и последующих ступеней РН.

### Благодарности

Исследования проведены при поддержке гранта Минобрнауки РФ № 9.1023.2017 ПЧ.

### Примечания

<sup>1</sup> Дальтон — внесистемная единица массы, применяемая для масс молекул и атомов.

### Список источников

1. Куденцов В. Ю., Трушляков В. И. Моделирование газодинамических потоков внутри типовых конструкций топливных баков ракет // Вестник СибАДИ. 2013. № 5 (33). С. 116–122.

2. 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.

3. Русанов А. И. Мицеллообразование в растворах поверхностно-активных веществ. СПб.: Химия, 1992. 280 с.

4. Zhang X., Basaran O. A. An experimental study of dynamics of drop formation // Physics of fluids. 1995. Vol. 7. P. 1184–1203. DOI: 10.1063/1.868577.

5. Stone H. A., Leal L. G. The effects of surfactants on drop deformation and breakup // Journal of Fluid Mechanics. 1990. Vol. 220. P. 161–186. DOI: 10.1017/S0022112090003226.

6. Chen R.-H., Phuoc T. X., Martello D. Effect of nanoparticles on nanofluid droplet evaporation // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. Vol. 53, Issues 19–20. P. 3677–3682. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.04.006.

7. Mohsen A. Hashem. Effect of surfactants on mass transfer coefficients of single liquid drops // Alexandria Engineering Journal. 2005. Vol. 44. P. 477–486.

8. Raleigh W. J., Thimineur R. J., Zotto A. A. Silicone surfactants. US patent 5008103; filed December 29th, 1988; published April 16th, 1991.

9. Camino G., Lomakin S. M., Lazzari M. Polydimethylsiloxane thermal degradation. Part 1 // Kinetic Aspects. Polymer. 2001. Vol. 42 (6). P. 2395–2402. DOI: 10.1016/S0032-3861(00)00652-2.

10. Austin P. J., Buch R. R., Kashiwagi T. Gasification of silicone fluids under external thermal radiation. Part I. Gasification rate and global heat of gasification // Fire and Materials. 1998. Vol. 22 (6). P. 221–237.

11. Kuo K. K., Cheung F. B. Droplet entrainment and breakup by shear flows // JANNAF Combustion Subcommittee Meeting. Monterey, CA. 1993. Vol. 1. P. 59–72.

12. Oliemans R. V. A., Pots B. F. M., Trompe N. Modelling of annular dispersed two-phase flow in vertical pipes // International Journal of Multiphase Flow. 1986. Vol. 12, Issue 5. P. 711–732. DOI: 10.1016/0301-9322(86)90047-9.

13. Ishii M., Mishima K. Droplet entrainment correlation in annular two-phase flow // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1989. Vol. 32, Issue 10. P. 1835–1846. DOI: 10.1016/0017-9310(89)90155-5.

14. Hewitt G. F., Govan A. H. Phenomenological modelling of non-equilibrium flows with phase change // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1990. Vol. 33, Issue 2. P. 229–242. DOI: 10.1016/0017-9310(90)90094-B.

15. Pan L., Hanratty T. J. Correlation of entrainment for annular flow in vertical pipes // International Journal of Multiphase Flow. 2002. Vol. 28, Issue 3. P. 363–384. DOI: 10.1016/0017-9310(90)90094-B.

16. Barbosa J. R., Hewitt G. F., Künig G. [et al.]. Liquid entrainment, droplet concentration and pressure gradient at the onset of annular flow in a vertical pipe // International Journal of Multiphase Flow. 2002. Vol. 28. P. 943–961. DOI: 10.1016/S0301-9322(02)00003-4.

17. Sawant P., Ishii M., Mori M. Droplet entrainment correlation in vertical upward co-current annular two-phase flow // Nuclear Engineering and Design. 2008. Vol. 238, Issue 6. P. 1342–1352. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2007.10.005.

18. Sawant P., Ishii M., Mori M. Prediction of amount of entrained droplets in vertical annular two-phase flow // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2009. Vol. 30, Issue 4. P. 715–728. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2009.03.003.

19. Cioncolini A., Thome J. R. Prediction of the entrained liquid fraction in vertical annular gas–liquid two-phase flow // International Journal of Multiphase Flow. 2010. Vol. 36, Issue 4. P. 293–302. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.11.011.

20. Минко М. В., Ягов В. В. Приближенная модель уноса капель в дисперсно-кольцевом двухфазном потоке // Вестник Московского энергетического института. 2012. № 2. С. 30–33.

21. Нигматулин Б. И., Рачков В. И., Шугаев Ю. З. Исследование интенсивности уноса влаги с поверхности жидкой пленки при восходящем течении пароводяной смеси // Теплоэнергетика. 1981. № 4. С. 33–36.

**ТРУШЛЯКОВ Валерий Иванович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Авиа- и ракетостроение» (АВиРС) Омского государственного технического университета (ОмГТУ). Адрес для переписки: vatrushluakov@yandex.ru  
**КУДЕНЦОВ Владимир Юрьевич**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры АВиРС ОмГТУ.

**БУРЯК Алексей Константинович**, доктор химических наук, профессор (Россия), директор Института физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина РАН.

**МАТЮШИН Дмитрий Дмитриевич**, младший научный сотрудник Института физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина РАН.

**Для цитирования**

Трушляков В. И., Куденцов В. Ю., Буряк А. К., Матюшин Д. Д. Влияние поверхностно-активных веществ на обра-

зование капель с поверхности пленки жидкого керосина при его испарении в баке ракеты-носителя // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2017. Т. 1, № 2. С. 33–40.

**Статья поступила в редакцию 20.10.2017 г.**

© **В. И. Трушляков, В. Ю. Куденцов, А. К. Буряк, Д. Д. Матюшин**

# INFLUENCE OF SURFACTANTS ON FORMATION OF DROPLETS OF LIQUID FROM THE SURFACE OF FILM DURING KEROSENE VAPORIZATION IN TANK LAUNCHER

V. I. Trushlyakov<sup>1</sup>, V. Yu. Kudentsov<sup>1</sup>, A. K. Buryak<sup>2</sup>, D. D. Matyushin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Omsk State Technical University,  
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

<sup>2</sup>Russian Academy of Sciences A. N. Frumkin Institute  
of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS (IPCE RAS),  
Russia, Moscow, Leninskij Pr. 31/4, 119071

The method of increasing the efficiency of evaporation of kerosene based on convective heat transfer in closed volumes and the introduction of a surfactant is developed. The method is relevant for many technological processes including: production of the launch vehicle (LV) with liquid rocket engines (LRE) in the shops of the manufacturer (drying fuel tanks after a technological operations associated with filling their technological fluids for washing, calibration, hydraulic testing, etc.); operation of the LV after shutting off of the LRE to ensure explosion safety of fuel tanks, extraction of unused energy resources in liquid fuel residues in LV tanks.

The results of an experimental study of the effect of surfactants on the thermophysical parameters of liquid kerosene on the determination of the coefficient of surface tension, viscosity with allowance for the introduced surfactants for various degrees of concentration are presented. It is recommended for surfactants based on polydimethylsiloxane for its possible use as an additive in kerosene.

There are obtained experimental data on the effect of a surfactant based on polydimethylsiloxane on the surface tension of kerosene with various mass concentrations of surfactants.

The application of surfactants to cryogenic fuels (for example, to liquid oxygen) is difficult, in view of the absence of surfactants active at such low temperatures.

Theoretical estimates of the effect of surfactants on the intensity of droplet entrainment from a free surface are considered. It has been established that the introduction of a surfactant with a mass content of 0,2 % reduces the critical droplet breakdown rate by 18–22 %.

**Keywords:** evaporation, liquid residues of kerosene, fuel tank of the launch vehicle, surfactants.

## Acknowledgements

The research is supported by the grant of the Ministry of education and science of the Russian Federation «Improvement of environmental safety and economic efficiency of launch vehicles with main liquid rocket engines», No. 9.1023.2017 PCH.

## References

1. Kudentsov V. Yu., Trushlyakov V. I. Modelirovaniye gazodinamicheskikh potokov vnutri tipovykh konstruktсий toplivnykh bakov raket [Gasdynamic flow modeling in typical constructions of rocket fuel tanks] // Vestnik SibADI. Vestnik SibADI. 2013. No. 5 (33). P. 116–122. [In Russ.].
2. 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.].
3. Rusanov A. I. Mitselloobrazovaniye v rastvorakh poverkhnostno-aktivnykh veshchestv [Micelle formation in solutions of surfactants]. Saint-Petersburg: Khimiya Publ., 1992. 280 p. [In Russ.].
4. Zhang X., Basaran O. A. An experimental study of dynamics of drop formation // Physics of fluids. 1995. Vol. 7. P. 1184–1203. DOI: 10.1063/1.868577. [In Engl.].
5. Stone H. A., Leal L. G. The effects of surfactants on drop deformation and breakup // Journal of Fluid Mechanics. 1990. Vol. 220. P. 161–186. DOI: 10.1017/S0022112090003226. [In Engl.].
6. Chen R.-H., Phuoc T. X., Martello D. Effect of nanoparticles on nanofluid droplet evaporation // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. Vol. 53, Issues 19–20. P. 3677–3682. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.04.006. [In Engl.].
7. Mohsen A. Hashem. Effect of surfactants on mass transfer coefficients of single liquid drops // Alexandria Engineering Journal. 2005. Vol. 44. P. 477–486. [In Engl.].
8. Raleigh W. J., Thimineur R. J., Zotto A. A. Silicone surfactants. US patent 5008103; filed December 29th, 1988; published April 16th, 1991. [In Engl.].
9. Camino G., Lomakin S. M., Lazzari M. Polydimethylsiloxane thermal degradation. Part 1 // Kinetic aspects. Polymer. 2001. Vol. 42 (6). P. 2395–2402. DOI: 10.1016/S0032-3861(00)00652-2. [In Engl.].
10. Austin P. J., Buch R. R., Kashiwagi T. Gasification of silicone fluids under external thermal radiation. Part I. Gasification rate and global heat of gasification // Fire and Materials. 1998. Vol. 22 (6). P. 221–237. [In Engl.].
11. Kuo K. K., Cheung F. B. Droplet entrainment and breakup by shear flows // JANNAF Combustion subcommittee meeting, Monterey, CA. 1993. Vol. 1. P. 59–72. [In Engl.].
12. Oliemans R. V. A., Pots B. F. M., Trompe N. Modelling of annular dispersed two-phase flow in vertical pipes // International Journal of Multiphase Flow. 1986. Vol. 12, Issue 5. P. 711–732. DOI: 10.1016/0301-9322(86)90047-9. [In Engl.].
13. Ishii M., Mishima K. Droplet entrainment correlation in annular two-phase flow // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1989. Vol. 32, Issue 10. P. 1835–1846. DOI: 10.1016/0017-9310(89)90155-5. [In Engl.].
14. Hewitt G. F., Govan A. H. Phenomenological modelling of non-equilibrium flows with phase change // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1990. Vol. 33, Issue 2. P. 229–242. DOI: 10.1016/0017-9310(90)90094-B. [In Engl.].

15. Pan L., Hanratty T. J. Correlation of entrainment for annular flow in vertical pipes // *International Journal of Multiphase Flow*. 2002. Vol. 28, Issue 3. P. 363–384. DOI: 10.1016/0017-9310(90)90094-B. [In Engl.].

16. Barbosa J. R., Hewitt G. F., Kizig G. [et al.]. Liquid entrainment, droplet concentration and pressure gradient at the onset of annular flow in a vertical pipe // *International Journal of Multiphase Flow*. 2002. Vol. 28. P. 943–961. DOI: 10.1016/S0301-9322(02)00003-4. [In Engl.].

17. Sawant P., Ishii M., Mori M. Droplet entrainment correlation in vertical upward co-current annular two-phase flow // *Nuclear Engineering and Design*. 2008. Vol. 238, Issue 6. P. 1342–1352. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2007.10.005. [In Engl.].

18. Sawant P., Ishii M., Mori M. Prediction of amount of entrained droplets in vertical annular two-phase flow // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2009. Vol. 30, Issue 4. P. 715–728. DOI:10.1016/j.ijheatfluidflow.2009.03.003. [In Engl.].

19. Cioncolini A., Thome J. R. Prediction of the entrained liquid fraction in vertical annular gas–liquid two-phase flow // *International Journal of Multiphase Flow*. 2010. Vol. 36, Issue 4. P. 293–302. DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.11.011. [In Engl.].

20. Minko M. V., Yagov V. V. Priblizhennaya model' unosa kapel' v dispersno-kol'tsevom dvukhfaznom potoke [The approximated model of droplet entrainment incipience in the annular-dispersed two-phase flow] // *Vestnik Moskovskogo nergeticheskogo instituta. MPEI Vestnik*. 2012. No. 2. P. 30–33. [In Russ.].

21. Nigmatulin B. I., Rachkov V. I., Shugayev Yu. Z. Issledovaniye intensivnosti unosa vlagi s poverkhnosti zhidkoy plenki pri voskhodyashchem techenii parovodyanoy smesi [The study of the intensity of entrainment of moisture from the surface

of the liquid film in upward flow of steam-water mixture] // *Teploenergetika. Teploenergetika*. 1981. No. 4. P. 33–36. [In Russ.].

---

**TRUSHLYAKOV Valeriy Ivanovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Aviation and Rocketry (AVIRS) Department of Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

Address for correspondence: [vatrushluakov@yandex.ru](mailto:vatrushluakov@yandex.ru)  
**KUDENTSOV Vladimir Yuriyevich**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of AVIRS Department, OmSTU, Omsk.

**BURYAK Aleksey Konstantinovich**, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Director of Russian Academy of Sciences A. N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry (IPCE RAS), Moscow.

**MATYUSHIN Dmitriy Dmitriyevich**, Junior Researcher, IPCE RAS, Moscow.

#### For citations

Trushlyakov V. I., Kudentsov V. Y., Buryak A. K., Matyushin D. D. Influence of surfactants on the formation of droplets of liquid from surface of film during kerosene vaporization in tank launcher // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2017. Vol. 1, no. 2. P. 33–40.

Received 20 November 2017.

© V. I. Trushlyakov, V. Y. Kudentsov, A. K. Buryak,  
D. D. Matyushin