

Методика расчета коэффициентов массоотдачи при осушке углеводородного ракетного топлива

77-30569/245147

11, ноябрь 2011

автор: Кобызев С. В.

УДК. 662.75

МГТУ им. Н.Э.Баумана

ksergeyv@hotmail.com

Надежность и безопасность ракетно-космической техники в значительной мере зависит от кондиционности применяемых компонентов жидкого ракетного топлива. Одна из современных проблем – обеспечение заданного техническими условиями [15] содержания воды в составе углеводородных ракетных горючих (УВГ). Существующие сегодня процессы производства и транспортировки УВГ обеспечивают их поставку потребителю в состоянии насыщения по растворенной воде и с некоторым содержанием взвешенных капель свободной, нерастворенной воды. Подробное актуальное исследование распределения размеров капель воды в составе УВГ приведено, например, в [19]. Капли свободной, нерастворенной воды могут быть удалены путем пропускания смеси через фильтры-коагуляторы. Содержание растворенной воды в углеводородном топливе при этом остается неизменным, близким к насыщению. Растворимость воды в УВГ типа авиационного и ракетного керосина при 25°C оценивается [19], [34], [35] в 50...150 ppm и в значительной степени зависит от температуры, оставаясь, тем не менее, во всем температурном диапазоне применения УВГ (-38°C...+30°C) значительно больше допустимого на выходе для заправочных систем ракет-носителей (1 ppm).

Для удаления растворенной воды из УВГ может быть применен метод барботажа сухим азотом. Для определения массообменных характеристик существующих барботажных аппаратов, определения потребного количества азота для барботажа и выработки методик определения рациональных параметров проектируемых массообменных аппаратов необходимо построение математической модели процесса массообмена в барботажном аппарате. Настоящая работа посвящена определению

коэффициента массоотдачи для процесса конвективной диффузии растворенной в УВГ воды в одиночный движущийся пузырь газообразного азота.

Для определения режима конвективной диффузии необходимо определить значения характеризующих этот процесс безразмерных чисел подобия Рейнольдса Re , Шмидта Sh , Пекле Pe , Вебера We , Этвеша $Ео$ (называемого также критерием Бонда Bo) и Мортон Mo для получения, в конечном итоге, диапазона возможных значений числа Шервуда Sh , на базе которых производится проектирование и анализ массообменных аппаратов.

Рейнольдс	$Re = \frac{Vd\rho}{\mu}$
Шмидт	$Sc = \frac{\nu}{D}$
Пекле	$Pe_D = ReSc = \frac{Vd}{D}$
Вебер	$We = \frac{\rho V^2 d}{\sigma}$
Этвеш	$Eo = \frac{gd^2 \Delta \rho}{\sigma}$
Мортон	$Mo = \frac{g\mu^4 \Delta \rho}{\rho^2 \sigma^3},$

где V – скорость установившегося всплытия пузыря, d – диаметр пузыря, ρ – плотность жидкости, μ – динамическая вязкость жидкости, ν – кинематическая вязкость жидкости, D – коэффициент молекулярной диффузии, g – ускорение свободного падения, $\Delta\rho$ – разница плотностей жидкости и газа в пузыре, σ – коэффициент поверхностного натяжения. Значения физических параметров системы керосин – свободный азот – растворенная вода для диапазона температур $-40^\circ\text{C} \dots 25^\circ\text{C}$ приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

Температура, °C	Плотность УВГ, кг/м ³	Вязкость динамическая УВГ, Па·с	Коэффициент поверхностного натяжения УВГ, Н/м	Растворимость воды в УВГ, % масс. при Р=0,1 МПа для нафтали по ГОСТ 24614	Давление насыщенных паров УВГ, Па	Коэффициент молекулярной диффузии воды в УВГ, м ² /с
-40	884,7	$21,8 \cdot 10^{-3}$	0,033	0,0002	2,08	$0,59 \cdot 10^{-10}$
-20	864,8	$7,963 \cdot 10^{-3}$	0,032	0,0004...0,0007	6,73	$1,75 \cdot 10^{-10}$
-10	857,2	$5,53 \cdot 10^{-3}$	0,031	0,0007...0,0012	12,10	$2,6 \cdot 10^{-10}$
0	849,5	$4,07 \cdot 10^{-3}$	0,030	0,0014...0,0019	21,77	$3,7 \cdot 10^{-10}$
10	841,7	$3,09 \cdot 10^{-3}$	0,029	0,0025...0,0028	39,15	$5,05 \cdot 10^{-10}$
20	833,8	$2,45 \cdot 10^{-3}$	0,028	0,0040...0,0043	70,42	$6,6 \cdot 10^{-10}$
30	825,8	$1,98 \cdot 10^{-3}$	0,027	0,0061...0,0065	126,6	$8,4 \cdot 10^{-10}$

Для приближенного определения температурной зависимости коэффициента молекулярной диффузии паров воды в УВГ при температурах, отличных от 20°C, было использовано уравнение Стокса-Эйнштейна:

$$\frac{D_{T_1}}{D_{T_2}} = \frac{T_1 \mu_{T_2}}{T_2 \mu_{T_1}}$$

Зависимость поверхностного натяжения от температуры найдена по формуле Гуггенхайма-Катаямы:

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 - \frac{T}{T_{кр}}\right)^{11/9}$$

Согласно работе [29], критическая температура керосина RP-1 [36] составляет 662K. Согласно работам [14] и [30], примерная средняя молекулярная формула RP-1 может быть записана как $C_{11,7}H_{22,8}$, что дает молекулярную массу 163,2 кг/моль, в то время как керосин РГ-1 [14, 15] имеет параметры $C_{12,3}H_{23,9}$ и 171,5 кг/моль, соответственно, что позволяет оценить критическую температуру РГ-1 в 695,7 K.

Если принять $T_{кр}$ для УВГ равной 695,7 K, а $\sigma=0,028$ Н/м при 20°C, то $\sigma_0=0,055$ Н/м

Давление насыщенных паров керосина определяем по формуле

$$\lg P_s = 0,025488T - 5,6241 \text{ (Па)}$$

Коэффициент молекулярной диффузии воды в УВГ в явном виде в литературе не приводится. Для определения этого коэффициента были использованы данные о составе ракетных керосинов RP-1 и РГ-1 [14], [26], использованы сведения об отличиях в составе этих керосинов и использован метод суррогатной смеси, примененный, в частности, в [18] и [21]. Реальный ракетный керосин, производимый сегодня, состоит из множества (только содержащихся в массовой доле более процента — несколько десятков) индивидуальных веществ, по многим из которых нет данных в литературе [24-28]. Использование суррогатной смеси соответствующего состава, состоящей из веществ с известными параметрами, позволяет моделировать такие характеристики реального УВГ, как плотность, скорость звука, вязкость, теплопроводность, коэффициенты диффузии. Были рассмотрены индивидуальные вещества, характерные для четырех групп представленных в керосине углеводородов. Ракетный керосин состоит, в основном, из парафинов, изопарафинов и циклопарафинов с числом углеродных атомов от 9 до 14. Представим в таблице 2 суррогатное горючее следующего состава:

Таблица 2

Компонент	Массовая доля x_i в суррогатном горючем	Коэффициент молекулярной диффузии компонента в воде, D_i , м ² /с
Н-додекан	0,25	$5,06 \cdot 10^{-10}$
Н-тридекан	0,25	$4,78 \cdot 10^{-10}$
1-транс-3-диметилциклогексан	0,15	$6,88 \cdot 10^{-10}$
1,1,3-триметилциклогексан	0,15	$6,77 \cdot 10^{-10}$
Н-октадекан	0,10	$3,75 \cdot 10^{-10}$
Н-нонадекан	0,10	$3,58 \cdot 10^{-10}$

Согласно [22] и [23] принимаем, что коэффициенты диффузии компонентов суррогатной смеси в воде и диффузии воды в компонентах суррогатной смеси равны между собой.

Коэффициент молекулярной диффузии воды в суррогатном горючем, составленном по таблице 2

$$D_{\Sigma} = \sum_1^4 D_i x_i = 6,6 \cdot 10^{-10}, \text{ м}^2/\text{с при } 20^{\circ}\text{C}$$

При определенных физических параметрах УВГ могут быть рассчитаны значения Re , Pe , $Ео$ и $Мо$ для различных комбинаций значений температуры и диаметра пузырька азота. Числа Рейнольдса Re и Пекле Pe определяются по зависимостям, представленным на рисунке из работы [33]. Рассчитанные значения критериев подобия приведены в Таблице 3.

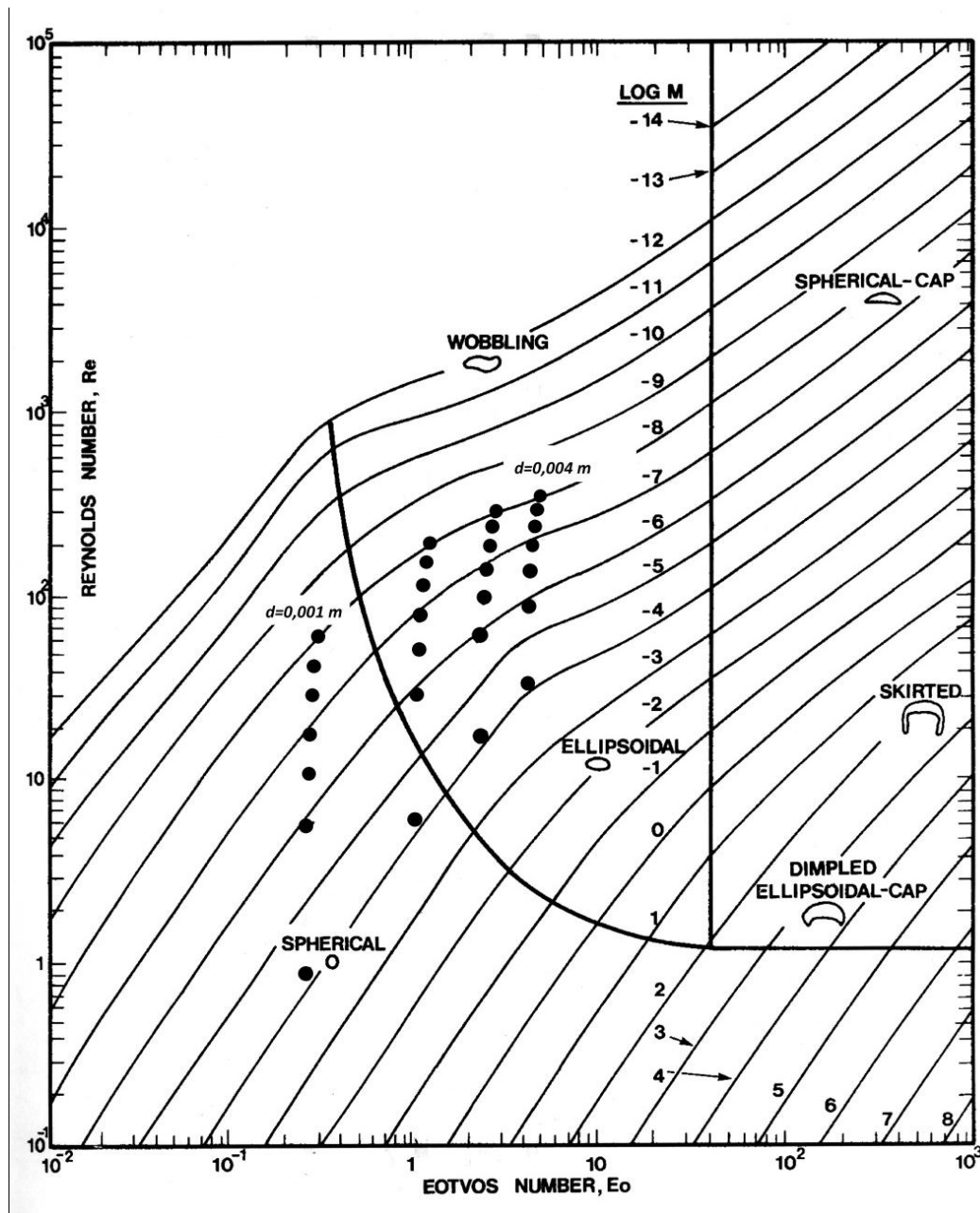
Таблица 3.

Температура, °C	Диаметр пузыря, м							
	0,001		0,002		0,003		0,004	
-40°C	0,84	$3,51 \cdot 10^{-5}$	5,85	$2,44 \cdot 10^{-6}$	16,6	$6,92 \cdot 10^{-6}$	31,8	$1,33 \cdot 10^{-7}$
	0,263	-4,16	1,05	-4,16	2,37	-4,16	4,21	-4,16
-20°C	5,37	$2,83 \cdot 10^{-5}$	27,8	$1,46 \cdot 10^{-6}$	58,5	$3,08 \cdot 10^{-6}$	86,2	$4,53 \cdot 10^{-6}$
	0,265	-5,86	1,06	-5,86	2,39	-5,86	4,24	-5,86
-10°C	10,4	$2,58 \cdot 10^{-5}$	49,1	$1,22 \cdot 10^{-6}$	95,0	$2,35 \cdot 10^{-6}$	133,8	$3,32 \cdot 10^{-6}$
	0,271	-6,45	1,09	-6,45	2,44	-6,45	4,34	-6,45
0°C	17,0	$2,20 \cdot 10^{-5}$	75,2	$9,74 \cdot 10^{-5}$	136,4	$1,77 \cdot 10^{-6}$	182,5	$2,36 \cdot 10^{-6}$
	0,278	-6,93	1,11	-6,93	2,50	-6,93	4,44	-6,93
10°C	27,8	$2,02 \cdot 10^{-5}$	110,9	$8,06 \cdot 10^{-5}$	182,5	$1,33 \cdot 10^{-6}$	234,8	$1,71 \cdot 10^{-6}$
	0,285	-7,36	1,14	-7,36	2,56	-7,36	4,56	-7,36
20°C	39,7	$1,77 \cdot 10^{-5}$	156,3	$6,96 \cdot 10^{-5}$	226,0	$1,01 \cdot 10^{-6}$	283,3	$1,26 \cdot 10^{-6}$
	0,292	-7,71	1,17	-7,71	2,63	-7,71	4,67	-7,71
30°C	58,1	$1,66 \cdot 10^{-5}$	187,3	$5,35 \cdot 10^{-5}$	294,5	$8,41 \cdot 10^{-5}$	337,4	$9,63 \cdot 10^{-5}$
	0,30	-8,03	1,2	-8,03	2,7	-8,03	4,8	-8,03

Структура таблицы 3.

Температура, °C	Диаметр пузыря, м	
	0,001	
-40°C	<i>Re</i>	<i>Pe</i>
	<i>Ео</i>	<i>Lg(Mo)</i>

Таким образом, для выбранного диапазона температур и диапазона диаметров пузырьков определены характеристики УВГ и характерные значения чисел подобия.



Таким образом, из таблицы 4 и рисунка можно определить, что для диапазона характеристик пузырей, свойственных применяемому в наземном оборудовании барботажным аппаратам, будет наблюдаться сферическая или эллиптическая форма пузырей. Для пузырей сферической формы при числах Рейнольдса, меньших 1, процесс конвективной диффузии может быть проанализирован аналитически.

Рассмотрим процесс диффузии растворенной в УВГ воды в пузырь азота.

Дифференциальное уравнение конвективной диффузии
В векторной форме

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)C = D \Delta C$$

в сферической системе координат

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + V_r \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{dC}{d\theta} + \frac{V_\varphi}{r \sin \theta} \frac{dC}{d\varphi} = \\ & = D_M \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial C}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 C}{\partial \varphi^2} \right) \end{aligned}$$

Учитываем осевую симметрию и стационарность задачи

$$V_r \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{dC}{d\theta} = D_M \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial C}{\partial \theta} \right) \right) \quad 1$$

При больших числах Pe , как это имеет место в данном случае, можно пренебречь в уравнении 1 вторым слагаемым в правой части. Окончательно получаем дифференциальное уравнение стационарной конвективной диффузии в сферической системе координат:

$$V_r \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{dC}{d\theta} = D_M \left(\frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \right) \quad 2$$

Граничные условия

$$C|_{r=a} = C_{\text{ст}}, \quad C|_{r \rightarrow \infty} = C_\infty, \quad 3$$

Где a – радиус пузыря, $C_{\text{ст}}$ – концентрация воды в УВГ на внешней стороне поверхности раздела фаз. Целью интегрирования уравнения 2 с граничными условиями 3 является получение значения критерия Шервуда Sh (безразмерного коэффициента массоотдачи)

$$Sh = Nu_D = \frac{2\pi a^3}{C_\infty - C_a} \int_0^\pi \left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{r=a} \sin \theta \, d\theta$$

В качестве исходных данных для решения задачи массопереноса выступают результаты решения гидродинамической задачи.

Гидродинамическая обстановка по Стоксу (сферические пузыри при малых числах Re при полном прилипании на поверхности)

$$\begin{aligned} V_r &= U_\infty \cos \theta \left(1 - \frac{3a}{2r} + \frac{1}{2} \frac{a^3}{r^3} \right) \\ V_\theta &= -U_\infty \sin \theta \left(1 - \frac{3a}{4r} - \frac{1}{4} \frac{a^3}{r^3} \right) \end{aligned}$$

Гидродинамическая обстановка по Эйлеру (сферические пузыри с полным проскальзыванием без учета циркуляции газа внутри пузыря)

$$\begin{aligned} V_r &= U_\infty \cos \theta \left(1 - \frac{a^3}{r^3} \right) \\ V_\theta &= -U_\infty \sin \theta \left(1 + \frac{1}{2} \frac{a^3}{r^3} \right) \end{aligned}$$

Из решения уравнения (2) при граничных условиях (3) имеем [11] для случая больших Pe решение вида

$$Sh = \frac{3}{8\Gamma\left(\frac{1}{3}\right)} (3\pi)^{2/3} (F_0 Pe)^{1/3} = 0,6246 (F_0 Pe)^{1/3} \quad 3$$

для течения без проскальзывания (стоксово обтекание) или с малым проскальзыванием при соблюдении дополнительного условия

$$Pe \ll F_0^2 (1 - F_0)^{-3}$$

И для случая движение с высоким проскальзыванием решение вида

$$Sh = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} [(1 - F_0) Pe]^{1/2} = 0,7979 [(1 - F_0) Pe]^{1/2} \quad 4$$

При соблюдении дополнительного условия

$$Pe \gg F_0^2 (1 - F_0)^{-3}$$

Результаты расчетов безразмерного коэффициента массоотдачи Sh для диффузии воды из УВГ типа РГ-1 в пузыри азота при малых числах Re (диаметр пузыря 0,001 при температуре -40°C и результаты, рассчитанные по [32] для других сочетаний температура – диаметр пузыря) представлены в таблице 4.

Таблица 4

Температура, $^\circ\text{C}$	Диаметр пузырька, м			
	0,001	0,002	0,003	0,004
-40°C	44,8	115,0	192,1	265,6
-20°C	56,3	125,4	181,1	219,4
-10°C	60,8	129,7	179,6	212,8
0°C	62,5	129,3	173,4	200,3
10°C	65,8	129,5	165,6	187,5
20°C	66,7	130,5	156,5	175,1
30°C	69,6	123,3	154,1	164,8

Вид взаимодействия пузыря со средой в значительной степени зависит от химического состава конкретной партии УВГ и наличия и концентрации примесей, которые могут играть роль поверхностно-активных веществ.

Однако решения, представленные в виде (3), (4) допускают осуществление рационального выбора коэффициента молекулярной диффузии из таблицы 4 путем проведения измерения времени всплытия пузыря известного диаметра в конкретной партии УВГ. Решение вида (3), (4) применимо только для чисел $Re < 1$, то есть в данном случае только для температуры -40°C и пузыря диаметром 1 мм. Тем не менее, этот случай представляется практически важным и для него возможна подстройка значения безразмерного коэффициента массоотдачи по результатам такого эксперимента.

Входящая в уравнения 3, 4 величина

$$F_0 = \frac{F}{F_{\text{ст}}}$$

где F – сила сопротивления движению пузырька с проскальзыванием, $F_{\text{ст}}$ – стоксова сила сопротивления для твердой сферы может быть оценена по времени всплытия пузырька до 1 мм диаметром в конкретной партии керосина как

$$F_0 = \frac{F}{F_{\text{ст}}} = \frac{1}{18} \frac{d^2 \Delta \rho g}{\mu V} = \frac{Eo \cdot Re}{We}$$

Таким образом, при известных значениях числа Шервуда Sh может быть найден коэффициент массоотдачи к пузырю как

$$\beta = \frac{Sh \cdot D_M}{d}$$

Заключение

По полученным в настоящей статье безразмерным коэффициентам массоотдачи возможен расчет параметров массоотдачи одиночного пузыря на квазистационарном участке всплытия и расчет барботажного слоя в барботажном аппарате.

Список литературы

1. Александров И.А. Массопередача при ректификации и абсорбции многокомпонентных смесей. Л., «Химия», 1975. 375 с.
2. Гупало Ю.П., Полянин А.Д., Рязанцев Ю.С. Массообмен реагирующих частиц с потоком. – М.: Наука, 1985. – 336 с.
3. Уоллис, Г. Одномерные двухфазные течения, Пер. с англ. В.С. Данилина и Ю.А. Зейгарника. Под. Ред. И.Т. Аладьева. М.: «Мир», 1972. – 440 с.
4. Синайский Э.Г. Гидромеханика процессов нефтяной технологии. – М. Недра, 1992. – 191 с.
5. Жильцова О.А. Математическое моделирование процесса массопереноса в барботажных устройствах. Автореферат канд. техн. наук, Волгоград, 1997. – 27 с.
6. Синайский Э.Г., Лапица Е.Я., Зайцев Ю.В. Сепарация многофазных многокомпонентных систем. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002 – 821 с.
7. Протодьяконов И.О., Люблинская И.Е. Гидродинамика и массообмен в системах газ-жидкость. – Л.: Наука. 1990 г. – 349 с.
8. Plesset M.S., Prosperetti A. Bubble Dynamics and Cavitation//Ann. Rev. Fluid. Mech. – 1977. – V. 9. –P. 145-185.
9. Bankoff S.G. Diffusion-Controlled Bubble Growth//Advan. Chem. Eng. – 1966. – V. 6 – P. 1-60
10. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Часть 1. ММШ Спб. ФНО НПО «Профессионал», 2004 г. – 848 с.
11. Brunn P.O. Heat or Mass Transfer from Single Spheres in a Low Reynolds Number Flow, Int. J. Engng Sci Vol. 20, No. 7, pp. 817-822, 1982.

12. Ахметов Р.Г. Асимптотика решения задачи конвективной диффузии около сферы, Журнал вычислительной математики и математической физики, 1998, том 38, №6, с. 801-806.
13. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959. – 700 с.
14. Азов В., Воронцов Д. Последний бой углеводородов? Новости Космонавтики, 2008, том 18, №2(301), стр. 44-46.
15. ТУЗ8. 001244-81. НАФТИЛ, Технические условия. – 29 с.
16. Improvements in the Measurement of Distillation Curves. 2. Application to Aerospace/Aviation Fuels RP-1 and S-8. – Ind. Eng. Chem. Res 2006, 45 4381-4388.
17. Development of an Experimental Database and Kinetic Models for Surrogate Jet Fuels. http://www.stanford.edu/group/pitsch/publication/ColketJet_Fuel_Surrogate_AIAA_2007.pdf. (дата обращения 30.10.11).
18. Surrogate Mixture Model for the Thermophysical Properties of Synthetic Aviation Fuel S-8: Explicit Application of the Advanced Distillation Curve. M. L. Huber, B. L. Smith, L. S. Ott and T. J. Bruno, Energy Fuels, 2008, 22 (2), pp. 1104–1114.
19. Dispersed Water and Particulates in Jet Fuel: Size Analysis under Operational Conditions and Application Coalescer Disarming.- Alisdair Q. Clark, Alastair G. Smith and Steve Threadgold, Spenser E. Taylor, Ind. Eng. Chem. Res. 2011, 50, 5749-5765.
20. Variability of The Rocket Propellants RP-1, RP-2, and TS-5: Application of a Composition and Enthalpy-Explicit Distillation Curve Method, Lisa Starkey Ott, Amelia B. Hadler, and Thomas J. Bruno, Ind. Eng. Chem. Res. 2008, 47 9225-9233.
21. Preliminary Surrogate Mixture Models for the Thermophysical Properties of Rocket Propellants RP-1 and RP-2, M.L. Huber, E.W. Lemmon, L.S. Ott and T.J. Bruno, Energy & Fuels, 2009, 23 (6), pp. 3083–3088.
22. Кафаров В.В. Основы массопередачи: Учебник для студентов вузов. – 3-е изд., перераб. И доп. – М.: Высшая школа, 1979. – 439 с.
23. Лыков А.В. Тепломассообмен (Справочник) М., «Энергия», 1971. -560 с.
24. TPHCWGa: Total Petroleum Hydrocarbon Working Group Series, Volume 1: Petroleum Hydrocarbon Analysis in Soil and Water, Wade Weisman, 1998, Association for Environmental Health and Sciences. – pp. 98.
25. TPHCWGb: Total Petroleum Hydrocarbon Working Group Series, Volume 2: Composition of Petroleum Mixtures, Thomas L. Potter and Kathleen E. Simmons, 1998, Association for Environmental Health and Sciences. – pp. 102.
26. TPHCWGc: Total Petroleum Hydrocarbon Working Group Series, Volume 3: Selection of Representative TPH Fractions Based on Fate and Transport Considerations, John Gustafson, Joan Griffith Tell, and Doug Orem, 1997, Association for Environmental Health and Sciences. – pp. 102.
27. TPHCWGd: Total Petroleum Hydrocarbon Working Group Series, Volume 4: Development of Fraction Specific Reference Doses (RfDs) and Reference Concentrations (RfCs) for Total Petroleum Hydrocarbons, A Tveit, L.A. Hayes, S.H. Youngren, and D.V. Nakles, 1997, Association for Environmental Health and Sciences. – pp. 137.
28. TPHCWGe: Total Petroleum Hydrocarbon Working Group Series, Volume 5: Human Health Risk-Based Evaluation of Petroleum Contaminated Sites: Implementation of the Working Group Approach, Donna Vorhees, John Gustafson and Wade Weisman, 1999, Association for Environmental Health and Sciences. – pp. 60.

29. Comparative Study Of Kerosene And Methane Propellant Engines For Reusable Liquid Booster Stages, Holger Burkhardt, Martin Sippel, Armin Herbertz, Josef Klevanski Space Launcher Systems Analysis (SART), DLR, Cologne, Germany, Proceedings of the 4th International Conference on Launcher Technology "Space Launcher Liquid Propulsion" 3-6 December 2002 – Liège (Belgium). – pp. 10.
30. Liquid Fuels and Propellants for Aerospace Propulsion: 1903–2003, Tim Edwards, Journal Of Propulsion And Power, Vol. 19, No. 6, November–December 2003, pp. 1089-1107.
31. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1.-М.: Наука. Гл. ред. Физ-мат. Лит., 1987. – 464 с.
32. Соу С. Гидродинамика многофазных систем.-М.: Мир, 1971. – 536 с.
33. R. Clift, J.R. Grace, and M.E. Weber. Bubbles, Drops and Particles. Academic Press, London, 1st edition, 1978. – 380 с.
34. Solubility of water in aviation gasolines, Elizabeth W. Aldrich, Ind. Eng. Chem. Anal. Ed., 1931, 3 (4), pp. 348-354.
35. Drying Kerosene – Newton's. <http://www.newton-s.com/uses/drying-kerosene>, (дата обращения 30.10.11).
36. MIL-P-25576C Military Specification Propellant, Kerosene 10 Feb. 1967. – 8 с.

**Method of calculation of mass transfer coefficients at drainage of
hydrocarbon rocket propellant**
77-30569/245147

11, November 2011
author: Kobyzev S.V.

Bauman Moscow State Technical University

ksergeyv@hotmail.com

The author evaluates the possibility of hydrocarbon rocket fuel (UVG) drainage from the water which it contains by means of bubbling it with gaseous nitrogen. The author indicates water concentration in as-received condition of UVG and provides physical UVG parameters, calculates similarity numbers which are necessary for calculating the parameters of bubble motion and convective diffusion of water into a gas bubble for the case of stationary emersion of the bubble. The data cover UVG temperature range from -40 to 30 ° C and diameters of bubbles from 1 to 4 millimeters, which corresponds to the parameters of bubblers used in launch and technical complexes of rocket-space technology. The results of calculating mass transfer coefficient are given.

Publications with keywords: [drying](#)

Publications with words: [drying](#)

Reference

1. Aleksandrov I.A., Mass transfer in rectification and absorption of multicomponent mixtures, L., Khimiia, 1975, 375 p.
2. Gupalo Iu.P., Polianin A.D., Riazantsev Iu.S., The mass transfer of reacting particles with the flow, Moscow, Nauka, 1985, 336 p.
3. Uollis G., One-dimensional two-phase flow, Moscow, Mir, 1972, 440 p.
4. Sinaiskii E.G., Hydromechanics of processes of oil technology, Moscow, Nedra, 1992, 191 p.
5. Sinaiskii E.G., Lapiga E.Ia., Zaitsev Iu.V., Separation of multiphase multicomponent systems, Moscow, OOO «Nedra-Biznestsentr», 2002, 821 p.
6. Protod'iakonov I.O., Liublinskaia I.E., Hydrodynamics and mass transfer in the systems of gas-liquid, L., Nauka, 1990, 349 p.

7. Plesset M.S., Prosperetti A., Bubble Dynamics and Cavitation, *Ann. Rev. Fluid. Mech.* 9 (1977) 145-185.
8. Bankoff S.G., Diffusion-Controlled Bubble Growth, *Advan. Chem. Eng.* 6 (1966) 1-60.
9. Brunn P.O., Heat or Mass Transfer from Single Spheres in a Low Reynolds Number Flow, *Int. J. Engng Sci.* 20 (7) (1982) 817-822.
10. Akhmetov R.G., *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki* 38 (6) (1998) 801-806.
11. Levich V.G., *Physico-chemical hydrodynamics*, Moscow, Fizmatgiz, 1959, 700 p.
12. Azov V., Vorontsov D., *Novosti Kosmonavтики* 18 (2) (2008) 44-46.
13. Improvements in the Measurement of Distillation Curves. 2. Application to Aerospace/Aviation Fuels RP-1 and S-8. – *Ind. Eng. Chem. Res.* 45 (2006) 4381-4388.
14. Development of an Experimental Database and Kinetic Models for Surrogate Jet Fuels <http://www.stanford.edu/group/pitsch/publication/ColketJet_Fuel_Surrogate_AIAA_2007.pdf>.
15. M. L. Huber, B. L. Smith, L. S. Ott, T. J. Bruno, Surrogate Mixture Model for the Thermophysical Properties of Synthetic Aviation Fuel S-8: Explicit Application of the Advanced Distillation Curve, *Energy Fuels* 22 (2) (2008) 1104–1114.
16. Alisdair Q. Clark, Alastair G. Smith, Steve Threadgold, Spenser E. Taylor, Dispersed Water and Particulates in Jet Fuel: Size Analysis under Operational Conditions and Application Coalescer Disarming, *Ind. Eng. Chem. Res.* 50 (2011) 5749-5765.
17. Lisa Starkey Ott, Amelia B. Hadler, and Thomas J. Bruno, Variability of The Rocket Propellants RP-1, RP-2, and TS-5: Application of a Composition and Enthalpy-Explicit Distillation Curve Method, *Ind. Eng. Chem. Res.* 47 (2008) 9225-9233.
18. M.L. Huber, E.W. Lemmon, L.S. Ott and T.J. Bruno, Preliminary Surrogate Mixture Models for the Thermophysical Properties of Rocket Propellants RP-1 and RP-2, *Energy & Fuels* 23 (6) (2009) 3083–3088.
19. Kafarov V.V., *The basis of mass transfer*, Moscow, Vysshiaia shkola, 1979, 439 p.
20. Lykov A.V., *Heat and Mass Transfer (Reference)*, Moscow, Energiia, 1971, 560 p.
21. TPHCWGa: Total Petroleum Hydrocarbon Working Group Series, Volume 1: Petroleum Hydrocarbon Analysis in Soil and Water, Wade Weisman, 1998, Association for Environmental Health and Sciences, 98 p.
22. TPHCWGb: Total Petroleum Hydrocarbon Working Group Series, Volume 2: Composition of Petroleum Mixtures, Thomas L. Potter and Kathleen E. Simmons, 1998, Association for Environmental Health and Sciences, 102 p.
23. John Gustafson, Joan Griffith Tell, Doug Orem, TPHCWGc: Total Petroleum Hydrocarbon Working Group Series, Volume 3: Selection of Representative TPH Fractions Based on Fate and Transport Considerations, 1997, Association for Environmental Health and Sciences, 102 p.
24. A Tveit, L.A. Hayes, S.H. Youngren, D.V. Nakles, TPHCWGd: Total Petroleum Hydrocarbon Working Group Series, Volume 4: Development of Fraction Specific Reference Doses (RfDs) and Reference Concentrations (RfCs) for Total Petroleum Hydrocarbons, 1997, Association for Environmental Health and Sciences, 137 p.
25. Donna Vorhees, John Gustafson and Wade Weisman, TPHCWGe: Total Petroleum Hydrocarbon Working Group Series, Volume 5: Human Health Risk-Based Evaluation of Petroleum Contaminated Sites: Implementation of the Working Group Approach, 1999, Association for Environmental Health and Sciences, 60 p.
26. Holger Burkhardt, Martin Sippel, Armin Herbertz, Josef Klevanski, Comparative Study Of Kerosene And Methane Propellant Engines For Reusable Liquid Booster Stages, Space Launcher Systems Analysis (SART), DLR, Cologne, Germany, in: *Proceedings of the 4th International Conference on Launcher Technology "Space Launcher Liquid Propulsion"*, 3-6 December, 2002, Liège (Belgium), 10 p.

27. Tim Edwards, Liquid Fuels and Propellants for Aerospace Propulsion:1903–2003, Journal Of Propulsion And Power 19 (6, November–December) (2003) 1089-1107.
28. Nigmatulin R.I., Dynamics of multiphase media, Part 1, Moscow, Nauka, Gl. red. Fizmat. Lit., 1987, 464 p.
29. Sou S., The hydrodynamics of multiphase systems, Moscow, Mir, 1971, 536 p.
30. R. Clift, J.R. Grace, M.E. Weber, Bubbles, Drops and Particles, Academic Press, London, 1st edition, 1978, 380 p.
31. Elizabeth W. Aldrich, Solubility of water in aviation gasolines, Ind. Eng. Chem. Anal. Ed. 3 (4) (1931) 348-354.
32. Drying Kerosene – Newton's, < <http://www.newton-s.com/uses/drying-kerosene> >.
33. MIL-P-25576C Military Specification Propellant, Kerosene, 10 Feb., 1967, 8 p.