

# ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОГО ПОТОКА НА УНОС КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ ИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЁМКОСТИ

В. А. Урбанский, А. А. Петрук

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

На основе математического моделирования получены значения скоростей над поверхностью жидкости в экспериментальной ёмкости для обеспечения условия отрыва и уноса капель. Разработана программа физических экспериментов по уносу капель жидкости из экспериментальной ёмкости. Проведено физическое моделирование уноса капель жидкости из экспериментальной ёмкости, которое показало, что процент отделения жидкой фазы сепаратором увеличивается с увеличением температурного режима входного газового потока. При температуре входного газового потока равной 20 °С процент отделения составил 62 %, при 30 °С — 69 %, при 35 °С — 70 %, при 40 °С — 78 %.

**Ключевые слова:** центробежный сепаратор, капли жидкости, скорость газового потока, критерии подобия, параметры газового потока, двухфазный поток, унос капель жидкости, пассивация.

## 1. Введение

Согласно ГОСТ РФ [1], стандарту НАСА [2] и требованиям IADC [3], после завершения миссии жидкие остатки топлива в топливных баках космических аппаратов (КА) и отработавших ступенях ракет-носителей (РН) должны быть пассивированы (ликвидированы).

В [4] предложена пассивация жидких остатков топлива в баках путем их дожигания с помощью двигательной установки. В [5] предложен метод тангенциального вдува газа с последующим формированием двухфазного вихревого потока и уносом остатков жидкости.

По методу вдува газа проведены численные исследования в [6], в котором рассмотрены численные методы расчета увлечения капель жидкости газовым потоком и получены замкнутые уравнения двухфазной модели, такие как скорость капель, скорость на границе газ – жидкость и коэффициент трения на границе газ – жидкость.

В [7–9] проведены численные исследования с использованием CFD моделирования по определению параметров газового потока, влияющих на унос капель жидкости.

В [7] представлены данные о полях скорости и концентрации примесей в конденсаторе, характеристиках теплообмена по полученным результатам расчетов процессов тепло- и массообмена внутри канала, на поверхности которого конденсируется пар из движущейся парогазовой смеси.

В [8] используется численное моделирование адиабатного пароводяного потока. Предложена методика расчета доли унесенной жидкости, результаты применения которой согласуются с доступными экспериментальными данными.

В [9] рассмотрена модель, позволяющая понять процесс уноса капель в кольцевом потоке. Модель была проверена на экспериментальных данных и представлены различные параметры, влияющие

на унос. Разработанная модель предсказывает механизм уноса в условиях закрученного потока с точностью до 30 %.

В [10] проанализирован процесс выделения капель из жидкой фазы в газовую, проведено сравнение экспериментальных измерений, результатов, имеющихся в литературе и разработанных в [10].

В [11] экспериментально исследована трансформация газожидкостного потока с помощью метода лазерно-индуцированной флуоресценции на основе яркости. Анализируется пространственно-временная эволюция толщины жидкой пленки. При больших скоростях газа тонкая жидкая пленка затягивается вверх до образования больших волн. Капли жидкости, увлекаемые со дна трубы и оседающие в верхних частях трубы, собираются в шлейфы ползущих подвесных капель в самой верхней части трубы; из-за осаждения капель не достигается непрерывное смачивание.

В [12] было исследовано начало уноса газа с помощью экспериментальных методов в сочетании с математическим моделированием больших вихрей, что позволило предсказать экспериментальные данные в пределах  $\pm 15\%$ .

В [13] была разработана модель глубокой нейронной сети (DNN) для прогнозирования доли уноса в кольцевом потоке. Разработанная модель DNN предсказывает фракцию увлечения с наименьшей средней абсолютной ошибкой (САО) в процентах по сравнению с существующими моделями. Модель включает 5 безразмерных входных параметров — число Рейнольдса жидкости, число Рейнольдса газа, число Вебера газа, плотность жидкости в газе, вязкость жидкости в газе и один выходной параметр (доля уноса). Разработанная модель DNN предсказывает фракцию увлечения с наименьшим САО по сравнению с существующими моделями.

Таким образом, в этом исследовании решаемую научную проблему можно сформулировать следующим образом: на основе теоретико-эксперимен-

Таблица 1. Начальные условия и исходные данные  
Table 1. Initial conditions and initial data

№	Параметр	Значение
1	Давление в ёмкости, $P$ (Па)	101325
2	Температура, $T$ (К)	300
3	Скорость входного потока, $v_{inlet}$ (м/с)	60–70
4	Начальная масса жидкости, $m_0$ (г)	270
5	Коэффициент поверхностного натяжения жидкости, $\sigma$	0,073
6	Диаметр капли жидкости, $d_{ж}$ (м)	$5 \cdot 10^{-4}$
7	Динамическая вязкость газа, $\eta_{gas}$ (Па·с)	$172 \cdot 10^{-7}$
8	Вязкость газа, $\mu$ (Па·с)	$15 \cdot 10^{-6}$
9	Давление в ёмкости, $P$ (кПа)	150–270
10	Температура газа, $T$ (К)	300
11	Температура жидкости, $T_{ж}$	300
12	Плотность газа, $\rho_r$ (кг/м <sup>3</sup> )	1,1814
13	Плотность жидкости, $\rho_{ж}$ (кг/м <sup>3</sup> )	996,81

тальных исследований определить влияние параметров газового потока на унос капель жидкости из экспериментальной ёмкости (ЭЁ).

## 2. Постановка проблемы

Для решения сформулированной научной проблемы необходимо провести её декомпозицию на ряд взаимосвязанных задач, имеющих решения.

Задача 1. Оценка параметров подаваемого газа (воздуха) в ЭЁ для обеспечения условий уноса капель жидкости на основе численного моделирования на основе программного комплекса Ansys-Fluent [14].

Задача 2. Разработка программы физических экспериментов по уносу капель жидкости из ЭЁ.

Задача 3. Создание экспериментального стенда с соответствующим метрологическим оборудованием.

Задача 4. Проведение экспериментальных исследований.

Задача 5. Анализ полученных результатов.

## 3. Оценка параметров подаваемого газа (воздуха) в ЭЁ для обеспечения условий уноса капель жидкости

Для определения необходимого массового расхода газа на входе в экспериментальную ёмкость необходимо на основе теории подобия предварительно определить числа Вебера (We), Фруда (Fr), Стокса (St) и Рейнольдса (Re) [15, с. 45], удовлетворяющие условиям отрыва уноса капель с поверхности жидкости.

В табл. 1 приведены исходные данные для определения чисел подобия.

Число Фруда (Fr) — один из критериев подобия движения жидкостей или газов, применяемый в случаях, когда существенно воздействие силы тяжести. Число Фруда характеризует соотношение между инерционной силой и силой тяжести, действующими на элементарный объём жидкости или газа. Так, при числе Фруда больше единицы турбулентные потоки преобладают над силами тяжести.

Число Вебера (We) — критерий подобия, определяющий отношение инерции жидкости к поверхностному натяжению. При числах We больше

Таблица 2. Значения чисел, удовлетворяющие условию уноса капель

Table 2. Values of numbers satisfying the droplet drift condition

$v$ , м/с	Fr	We	St	Re
3,7	0,985	$6,738 \cdot 10^4$	$1,674 \cdot 10^5$	$1,546 \cdot 10^8$
3,75	0,998	$6,921 \cdot 10^4$	$1,697 \cdot 10^5$	$1,567 \cdot 10^8$
3,76	1	$6,943 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^5$	$1,569 \cdot 10^8$
3,8	1,011	$7,107 \cdot 10^4$	$1,72 \cdot 10^5$	$1,588 \cdot 10^8$
4	1,064	$7,785 \cdot 10^4$	$1,81 \cdot 10^5$	$1,671 \cdot 10^8$
Удов- летво- ряющие значения	$\geq 1$	$\geq 1$	$\geq 1$	$3200 \geq X \geq 10000$

единицы инерционные силы становятся больше сил поверхностного натяжения.

Число Стокса St, которое позволяет оценить влияние инерционных сил на движение частицы, может быть использовано для описания уноса капель жидкости в газовом потоке, в том случае если  $St \ll 1$ .

При значительных значениях числа Стокса ( $St > 1$ ), инерционные эффекты становятся значительными и движение частицы может быть турбулентным или сопровождаться сложной динамикой. В этом случае критерий Стокса может быть неприменим, и для описания движения частицы используются числа Вебера (We) и Рейнольдса (Re). Число Re характеризует соотношение между инерционными и вязкими силами в потоке, а также позволяет определить, является ли поток ламинарным ( $Re < 3200$ ) или турбулентным ( $Re > 3200$ ).

В табл. 2 приведены результаты определения необходимой минимальной скорости газа  $v_{min}$ , с помощью чисел Fr, We, St, Re, согласно которым необходимая скорость газа у поверхности жидкости равна 3,76 м/с для совершения отрыва и уноса капель с поверхности жидкости.

Определение скорости газа на поверхности жидкости в ЭЁ проводится на основе численного моделирования с использованием программного комплекса Ansys-Fluent [14]. Для решения данной задачи предпочтительно использовать вычислительную гидродинамику (CFD). Чтобы предсказать эти явления, CFD решает уравнения:

— **уравнение неразрывности** — является одним из основных уравнений в CFD. Оно описывает сохранение массы в потоке:

$$\frac{dp}{dt} + \frac{d}{dx}(\rho u_x) + \frac{d}{dy}(\rho u_y) + \frac{d}{dz}(\rho u_z) = 0,$$

где  $\rho$  — плотность;  $u$  — вектор скорости.

— **уравнение Навье–Стокса** — описывает движение жидкости или газа и является основным уравнением в CFD. Оно состоит из двух частей: уравнения сохранения импульса и уравнения сохранения энергии.

Уравнение сохранения импульса:

$$\rho \left( \frac{du}{dt} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 u + \rho \cdot g,$$

где  $\frac{du}{dt}$  — частная производная скорости по времени;

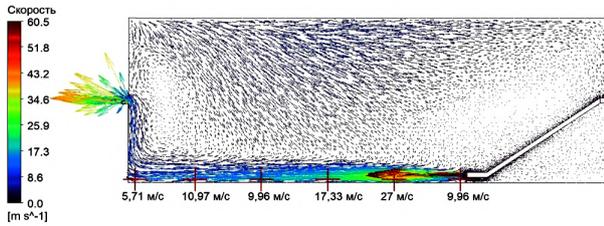


Рис. 1. Результат математического моделирования вдува идеального газа со скоростью 60 м/с  
Fig. 1. Result of mathematical modeling of an ideal gas blow-in with a velocity of 60 m/s

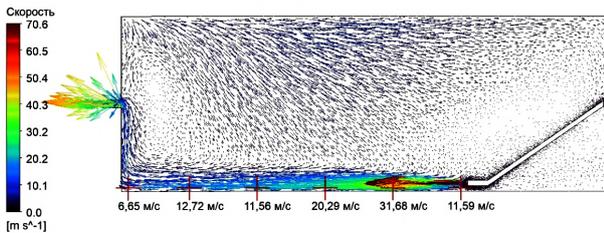


Рис. 2. Результат математического моделирования вдува идеального газа со скоростью 70 м/с  
Fig. 2. Result of mathematical modeling of an ideal gas blow-in with a velocity of 70 m/s

$u$  — вектор скорости;  
 $\nabla u$  — градиент скорости;  
 $P$  — давление;  
 $\mu$  — динамическая вязкость;  
 $g$  — ускорение свободного падения.  
 Уравнение сохранения энергии:

$$\rho \cdot C_p \left( \frac{dT}{dt} + u \cdot \nabla T \right) = \nabla(k \cdot \nabla T) + Q,$$

где  $C_p$  — удельная теплоемкость;  
 $T$  — температура;  
 $k$  — коэффициент теплопроводности;  
 $Q$  — источник или сток тепла.

Начальные и граничные условия численного моделирования приведены в табл. 1.

Результаты численного моделирования процесса вдува газа в ёмкость с различной скоростью вдува газа приведены на рис. 1, 2.

Полученные данные скоростей на поверхности жидкости позволили определить начальную скорость вдува газа в ёмкость, которая обеспечивает условия скорости газа на поверхности для уноса капель жидкости. Начальная скорость вдува газа в ёмкость, согласно проведенному численному моделированию, составила 67 м/с.

Предварительное математическое моделирование процесса вдува газа в ёмкость с разной начальной скоростью вдува газа ( $V_0 = 60$  м/с; 70 м/с).

#### 4. Разработка программы физического моделирования по выносу капель жидкости из ЭЁ

Целью физического моделирования является проведение процесса вдува газа в ёмкость с последующим уносом капель жидкости и получение значений параметров: входного газового потока (температура, скорость вдува); параметров внутри ёмкости (давление, температура); выходных параметров (объемный расход газа, количество унесен-

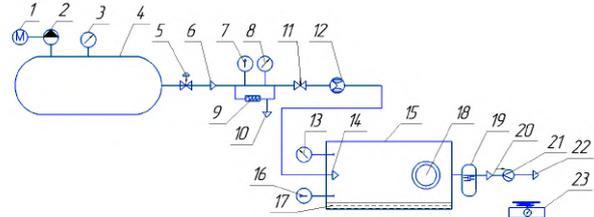


Рис. 3. Схема экспериментального стенда  
Fig. 3. Schematic diagram of the experimental stand

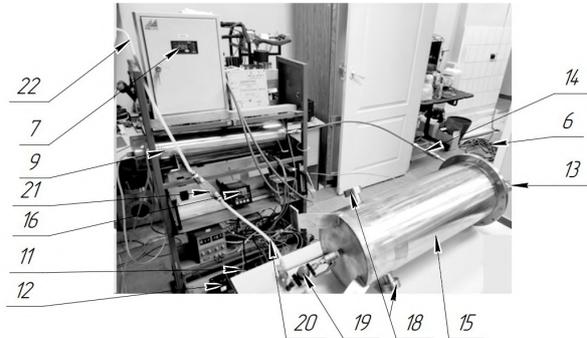


Рис. 4. Фото экспериментального стенда  
Fig. 4. Photo of the experimental stand

ной жидкости); с последующей обработкой результатов и оценки влияния параметров газового потока на унос капель жидкости.

Эксперименты проводились с объемным расходом газа, равным 200 л/мин, что при диаметре входного патрубка, равного 8 мм, составило скорость входного потока газа 67 м/с. Изменялся температурный режим входного газового потока.

Так как наблюдается повторяемость получаемых результатов, эксперименты проводились по три раза для каждого температурного режима: 20 °С, 30 °С, 35 °С, 40 °С. Температура жидкости была неизменна и равнялась комнатной; жидкость находилась в покое до момента начала подачи воздуха в ёмкость.

Выбранные температурные режимы обеспечивают более стабильные условия для экспериментов и позволяют получить воспроизводимые результаты.

Эксперимент прекращался в момент заполнения ёмкости сброса жидкости в ЦС (примерно 120 секунд).

Обработка результатов экспериментальных данных проводилась путем вычисления процентного соотношения выделенной жидкости ЦС от начальной и остаточной массы жидкости.

#### 5. Экспериментальный стенд с соответствующим метрологическим оборудованием

Исходные данные физического эксперимента представлены в табл. 1. Схема экспериментального стенда приведена на рис. 3. Фото экспериментального стенда представлено на рис. 4.

На рис. 3 представлена схема экспериментального стенда, в состав которого входит: 1 — электродвигатель, 2 — насос, 3 — манометр, 4 — ресивер с насосом, 5 — редуктор давления, 6 — магистраль подачи газа, 7 — датчик температуры, 8 — манометр, 9 — нагреватель, 10 — магистраль сброса холодного газа, 11 — дроссель расхода газа, 12 —

датчик расхода газа, 13 — датчик давления, 14 — патрубок ввода газа в экспериментальную ёмкость, 15 — экспериментальная ёмкость вариант «Б», 16 — датчик температуры в экспериментальной ёмкости, 17 — налитая жидкость в экспериментальную ёмкость, 18 — смотровое окно, 19 — центробежный сепаратор, 20 — вывод газа из центробежного сепаратора, 21 — ротаметр, 22 — магистраль сброса газа, 23 — лабораторные весы.

Экспериментальный стенд состоит из цилиндрической ёмкости 15 из нержавеющей стали (12X18H10T) длиной 720 мм и диаметром 260 мм с входным отверстием диаметром 8 мм и выходным отверстием диаметром 12 мм. ЭЁ осушалась, затем в нее заливалась взвешенная жидкость 17. Абсолютное давление в ёмкости варьировалось в пределах от 100 кПа до 205 кПа с помощью ресивера 4 и манометра 13. Скорость входного потока газа в экспериментальную ёмкость составила 67 м/с при постоянной температуре жидкости 17. Температура газа изменялась от 20 градусов до 40 с помощью нагревателя 9. На выходном отверстии использовался газожидкостный сепаратор 19 для улавливания унесенной жидкости и ежесекундного изменения массы унесенной жидкости.

Подготовка экспериментального стенда к работе:

- установка цилиндрической ёмкости 15 на более удобное место в горизонтальное положение;
- нагнетание давления с помощью электродвигателя 1 в ресивер 4 с помощью насоса 2 до значения 10 атмосфер;
- подведение газа с заданными параметрами давления к редуктору 5 для установления требуемых параметров;
- настройка редуктора давления 5 на значение 4,5 атм.;
- подключение трубопровода от редуктора давления 5 к приборам для регулировки и измерения скорости датчика расхода газа 11;
- подключение трубопровода от датчика расхода газа 11 к нагревательному устройству 9;
- подключение трубопровода от нагревательного устройства 9 к магистрали сброса холодного газа 10;
- подключение трубопровода от нагревательного устройства 9 к трубопроводу, расположенному на верхнем днище экспериментальной ёмкости 15;
- подключение манометра для измерения давления в ёмкости 13 к сети электропитания;
- подключение термометра для измерения температуры в ёмкости 16 к сети электропитания;
- подключение нагревательного устройства 9 к сети электропитания;
- подключение датчика расхода газа 11 к сети электропитания;
- подключение центробежного сепарационного устройства 19 к экспериментальной ёмкости 15;
- подключение трубопровода от центробежного сепарационного устройства 19 к ротаметру 21;
- подключение трубопровода от ротаметра 21 к магистрали сброса газа в атмосферу 22;
- регистрация показаний приборов при начальных условиях;
- визуальная проверка всего экспериментального стенда;
- предварительная осушка экспериментального стенда 15, трубопроводов, центробежного сепарационного устройства 19, смотровых окон 18 путем дувки газа через патрубок ввода газа 14 в экспериментальную ёмкость 15;

— открытие дросселирующей заслонки на магистрали подачи газа 6;

— настройка скорости подачи газа с помощью дросселя датчика расхода газа 11 с необходимой скоростью;

— поддержание установленной скорости в течение 10 минут;

— перекрытие дросселя датчика расхода газа 11;

— перекрытие дросселирующей заслонки на магистрали подачи газа 6;

— определение начальной массы жидкости с использованием лабораторных весов 23. Жидкость заливается в стеклянную градуированную мензурку, весом 64,238 г, мензурка с жидкостью устанавливается на лабораторные весы 23;

— в нормальном состоянии верхнее днище установочки закрыто. Открытие верхнего днища цилиндрической ёмкости 15;

— залив жидкости 17 в экспериментальную ёмкость 15;

— закрытие верхнего днища и затяжка крепежных элементов для герметичности;

— подключение трубопровода от выходного отверстия ёмкости к сепарационному устройству 19.

Порядок проведения экспериментального исследования:

— открытие дросселирующей заслонки 6;

— регулировка скорости подачи газа с помощью дросселя датчика расхода газа 11 (67 м/с);

— включение нагревательного устройства 9 и регулировка температурного режима;

— сброс холодного газа через магистраль сброса 10;

— после установления температурного режима нагревательного устройства 9 нагретый газовый поток поступает через патрубок ввода газа 14 в ёмкость 15;

— регистрация значений: давления, температуры входного газового потока, расхода газа в ёмкости;

— измерение изменения массы: отслеживание изменения массы жидкости во времени с помощью градуированного ЦС 19;

— поддержание установленной скорости в течение периода времени до того, как не заполнится ёмкость сброса жидкости, установленная в ЦС 19, эксперимент будет остановлен;

— закрытие регулирующей заслонки датчика расхода газа 11;

— закрытие дроссельной заслонки 6;

— измерение изменения массы жидкости в ёмкости путем сбора оставшейся жидкости на стенках в ёмкости 15 и взвешивания остатков на лабораторных весах 23;

— обработка полученных данных и построение зависимостей разности массы жидкости от скорости и температуры входного потока.

Метрологическое обеспечение:

Датчик давления АИР-20/М2-ДА модель 052 [16], фильтр-регулятор давления Festo LFR-1/4-D-5M-MINI [17], датчик расхода Festo SFAB-600U-WQ10-2SA-M12 [18], ресивер модель К-22 УХЛ4.2 [19], пластиковый расходомер F-VF-200 [20], весы лабораторные электронные BM-510DM [21].

## 6. Обработка полученных результатов

Полученные результаты физического эксперимента сведены в табл. 3. На рис. 5 показан график

Таблица 3. Результаты физического моделирования  
Table 3. Physical modeling results

Температурный режим 20 °С	Эксперимент № 1				Эксперимент № 2				Эксперимент № 3			
Начальная масса жидкости, $m_0$ (г)	280,48				275,4				250,5			
Время, $t$ (с)	30	60	90	120	30	60	90	120	30	60	90	120
Давление, $P$ (кПа)	194,5	195	194,9	194,7	194,1	194,7	195,2	195	194	195	195	195,2
Объемный расход газа, $Q$ (л/мин)	204	208	204	206	204	205	204	203	204	205	204	208
Температура газа, $T_{вх}$ (°С)	20,2	20,4	20,3	20,1	20,2	20,6	20,3	19,7	19,9	20	20,2	19,7
Масса унесенной жидкости, $m$ (г)	6	14	18	22,414	6	16	18	27,395	6	10	18	26,7
Расход газа на выходе, $Q$ (л/мин)	200				195				195			
Остаточная масса жидкости, $m_1$ (г)	247,185				230,585				204,66			
Температурный режим 30 °С	Эксперимент № 4				Эксперимент № 5				Эксперимент № 6			
Начальная масса жидкости, $m_0$ (г)	282,035				272,842				281,322			
Время, $t$ (с)	30	60	90	120	30	60	90	120	30	60	90	120
Давление, $P$ (кПа)	194	195	194,8	195,2	190	204	206	204	192	195	197	195
Объемный расход газа, $Q$ (л/мин)	204	204	205	208	205	204	206	204	203	202	206	207
Температура газа, $T_{вх}$ (°С)	28,9	31,1	31,6	32	31,6	33	32	31,4	33,6	32,3	31,4	30,7
Масса унесенной жидкости, $m$ (г)	6	12	15	19,43	6	12	16	25,1	6	10	18	27,1
Расход газа на выходе, $Q$ (л/мин)	200				190				190			
Остаточная масса жидкости, $m_1$ (г)	251,09				238,9				242,78			
Температурный режим 35 °С	Эксперимент № 7				Эксперимент № 8				Эксперимент № 9			
Начальная масса жидкости, $m_0$ (г)	277,09				283,07				284,25			
Время, $t$ (с)	30	60	90	120	30	60	90	120	30	60	90	120
Давление, $P$ (кПа)	192	191,8	192	192	190	193,9	195	196	196	197	197	202
Объемный расход газа, $Q$ (л/мин)	205	204	204	205	205,4	205,5	206,3	207	209	208	209	207
Температура газа, $T_{вх}$ (°С)	36,1	36,9	37	36,7	33,2	36,4	36,1	35,4	35	36,5	36,7	35,2
Масса унесенной жидкости, $m$ (г)	8	15	20	27,795	6	12	17	22,24	9	15	18	27,6
Расход газа на выходе, $Q$ (л/мин)	190				200				200			
Остаточная масса жидкости, $m_1$ (г)	238,41				252,69				241,97			
Температурный режим 40 °С	Эксперимент № 10				Эксперимент № 11				Эксперимент № 12			
Начальная масса жидкости, $m_0$ (г)	286,96				284,5				279,5			
Время, $t$ (с)	30	60	90	120	30	60	90	120	30	60	90	120
Давление, $P$ (кПа)	195,6	196,5	196	196,3	195	196,5	197	196,3	195,4	195,6	195,3	195,3
Объемный расход газа, $Q$ (л/мин)	207	208	209	207	207	208	206	207	206	208	207	206
Температура газа, $T_{вх}$ (°С)	39,9	42,7	43,5	42	38,1	38,9	39,4	39,8	38,4	40,4	40,7	40,7
Масса унесенной жидкости, $m$ (г)	7	14	18	27,163	7	14	18	27,52	8	16	20	26,123
Расход газа на выходе, $Q$ (л/мин)	200				200				200			
Остаточная масса жидкости, $m_1$ (г)	254,77				247,92				244,59			

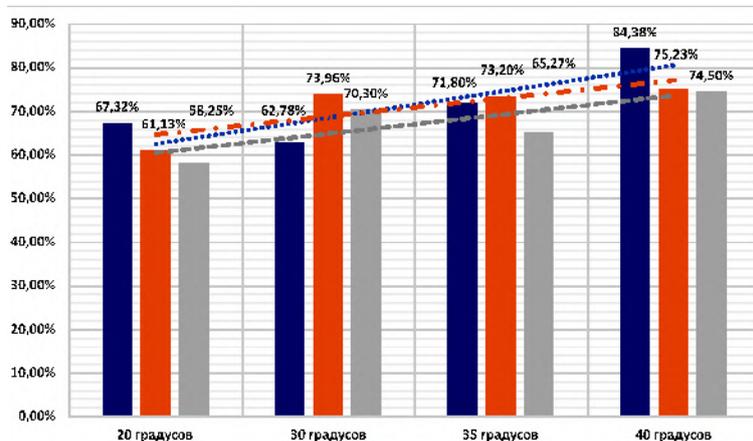


Рис. 5. График процента отделения жидкости от газожидкостного потока центробежным сепарационным устройством: левый столбец — первый эксперимент с данным температурным режимом; средний столбец — второй эксперимент с данным температурным режимом; правый столбец — третий эксперимент с данным температурным режимом  
 Fig. 5. Graph of percentage of liquid separation from gas-liquid flow by centrifugal separation device: left column — the first experiment with the given temperature regime; middle column — the second experiment with the given temperature regime; right column — the third experiment with the given temperature regime

процента отделения жидкости от газового потока центробежным сепаратором.

Как следует из рис. 5, процент отделения жидкой фазы сепаратором увеличивается с увеличением температурного режима входного газового потока. При 20 °С средний процент отделения составил 62 %, при 30 °С — 69 %, при 35 °С — 70 %, при 40 °С — 78 %.

### Выводы

1. В результате проведенного исследования сформулирована теоретико-экспериментальная методика исследования влияния параметров газового потока на унос капель жидкости.

2. На основе математического моделирования получены значения скорости над поверхностью жидкости в экспериментальной ёмкости для обеспечения условия отрыва и уноса капель, равна 3,76 м/с.

3. Проведено физическое моделирование уноса капель жидкости из ЭЁ, которое показало, что процент отделения жидкой фазы сепаратором увеличивается с увеличением температурного режима входного газового потока. Средний процент отделения составил при начальной скорости вдува газа 67 м/с и температуре: 20 °С — 62 %; 30 °С — 69 %; 35 °С — 70 %; 40 °С — 78 %.

### Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00531.

### Список источников

- ГОСТ Р. 52925-2018. Изделия космической техники. Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства. Введ. 01—01—2019. Москва: Стандартинформ, 2018. 11 с.
- NASA-STD-8719.9. Lifting Standard. URL: <https://standards.globalspec.com/std/13107882/NASA-STD-8719.9> (дата обращения: 21.04.2024).

- IADC-02-01. Space Debris Mitigation Guidelines. URL: <https://newspac economy.ca/wp-content/uploads/2022/09/iadc-space-debris-guidelines-revision-2.pdf> (дата обращения: 21.04.2024).

- Trushlyakov V., Urbansky V. Risk reduction of tank explosion based on passivation of unusable propellant residues // Journal of Space Safety Engineering. 2023. Vol. 10, Issue 4. P. 522—530. DOI: 10.1016/j.jsse.2023.09.005. EDN: KQXBNA.

- Briot D. Impacts of the Space Debris Mitigation Rules on the Spacecraft Design in Airbus Defence and Space // Proceedings of the 7th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, April 2017 / Eds. T. Flohrer, F. Schmitz. ESA Space Debris Office. URL: <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc7/paper/878/SDC7-paper878.pdf> (дата обращения: 12.04.2024).

- Inoue Ch., Maeda I. On the droplet entrainment from gas-sheared liquid film // Physics of Fluids. 2021. Vol. 33 (1). 011705. DOI: 10.1063/5.0038399.

- Минко К. Б., Артемов В. И., Яньков Г. Г. [и др.]. Численное моделирование конденсации пара при течении парогазовой смеси в канале переменного сечения с пучком гладких горизонтальных труб // Теплоэнергетика. 2019. № 12. С. 68—76. DOI: 10.1134/S0040363619120063. EDN: AAF LQP.

- Минко М. В., Ягов В. В. Моделирование распределения жидкости между ядром и пленкой в адиабатных дисперсно-кольцевых двухфазных потоках // Теплоэнергетика. 2014. № 1. С. 68. DOI: 10.1134/S0040363614010093. EDN: RPARCD.

- Wang K., Bai B., Ma W. A model for droplet entrainment in chum flow // Chemical Engineering Science. 2013. Vol. 104. P. 1045—1055. DOI: 10.1016/j.ces.2013.10.028.

- Berna C., Escrivá A., Muñoz-Cobo J. L. [et al.]. Review of droplet entrainment in annular flow: Interfacial waves and onset of entrainment // Progress in Nuclear Energy. 2014. Vol. 74. P. 14—43. DOI: 10.1016/j.pnucene.2014.01.018.

- Zdornikov S. A., Isaenkov S. V., Cherdantsev A. V. Axial and azimuthal development of disturbance waves in annular flow in a horizontal pipe // International Journal of Multiphase Flow. 2024. Vol. 172. 104704. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2023.104704.

- Durve A. P., Patwardhan A. W. Numerical and experimental investigation of onset of gas entrainment phenomenon // Chemical Engineering Science. 2012. Vol. 73. P. 140—150. DOI: 10.1016/j.ces.2012.01.030.

13. Mondal A., Sharma S. L. Prediction of entrainment fraction in two-phase gas-liquid co-current annular flow-A machine learning approach // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2024. Vol. 226. 125499. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125499.

14. Fluent A. Ansys fluent theory guide. Ansys Inc., USA, 2011. P. 724–746. URL: [https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main\\_pre.htm](https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm) (дата обращения: 12.04.2024).

15. Кутателадзе С. С., Стырикович М. А. Гидродинамика газожидкостных систем / под ред. И. В. Волобуева, Н. М. Пелунова. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергия, 1972. 296 с.

16. ТЕРЛОCONTROL-C: приборы регулирования и контроля технологических процессов. URL: <https://teplocontrol-c.ru/katalog/4355.html?ysclid=lr4uhs3ebx282428924> (дата обращения: 02.03.2024).

17. Промышленная автоматизация. URL: <https://industrialization.ru/162727/> (дата обращения: 02.03.2024).

18. Промышленная автоматизация. URL: <https://industrialization.ru/565403/> (дата обращения: 12.04.2024).

19. Продажа и ремонт компрессорного оборудования Бежецкого завода АСО // В-Compressor.ru. URL: <https://b-compressor.ru/product/resiver-dlya-kompressora-k22?ysclid=lr4usprj9b5528956702> (дата обращения: 12.04.2024).

20. А-FLOW F-VF200 Расходомеры акриловые // Новые технологии. URL: <https://aflow.nt-rt.ru/price/catalog/164152?ysclid=lr4uw85xrt448164401> (дата обращения: 12.04.2024).

21. Лабораторные весы ВЕСТА ВМ-510ДМ // Юмента-Казань. URL: [https://u-ves.ru/catalog/vesy/laboratornye\\_vesy/laboratornye\\_vesy\\_vm\\_510dm/?utm\\_source=yandex&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=Dinamika\\_Kazan&utm\\_content=10010167392&utm\\_term=&yclid=3385249188704944127](https://u-ves.ru/catalog/vesy/laboratornye_vesy/laboratornye_vesy_vm_510dm/?utm_source=yandex&utm_medium=cpc&utm_campaign=Dinamika_Kazan&utm_content=10010167392&utm_term=&yclid=3385249188704944127) (дата обращения: 12.04.2024).

**УРБАНСКИЙ Владислав Александрович**, кандидат технических наук, младший научный сотрудник НИЛ «Проектирование специальных бортовых систем ракет-носителей и космических аппаратов», ассистент кафедры «Авиа- и ракетостроение» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 2487-9142

ORCID: 0000-0002-8837-7050

AuthorID (SCOPUS): 57214753501

Адрес для переписки: vladurba95@gmail.com

**ПЕТРУК Антон Андреевич**, инженер НИЛ «Проектирование специальных бортовых систем ракет-носителей и космических аппаратов» ОмГТУ, г. Омск.

Адрес для переписки: apetruck1800@gmail.com

#### Для цитирования

Урбанский В. А., Петрук А. А. Теоретико-экспериментальные исследования влияния параметров газового потока на унос капель жидкости из экспериментальной ёмкости // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 3. С. 98–106. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-98-106.

Статья поступила в редакцию 27.05.2024 г.

© В. А. Урбанский, А. А. Петрук

# THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THE INFLUENCE OF GAS FLOW PARAMETERS ON THE ENTRAINMENT OF LIQUID DROPLETS FROM AN EXPERIMENTAL VESSEL

V. A. Urbansky, A. A. Petruk

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

**On the basis of mathematical modeling, the values of velocities above the liquid surface in the experimental vessel are obtained to ensure the condition of droplet detachment and entrainment. The program of physical experiments on the entrainment of liquid droplets from experimental vessel is developed. Physical modeling of liquid droplets entrainment from experimental vessel is carried out, which showed that the separated mass of liquid significantly depends on the parameters of the gas flow at the inlet to experimental vessel (temperature, flow velocity). At the temperature of the inlet gas flow equal to 20 °C the percentage of separation is 62 %, at 30 °C — 69 %, at 35 °C — 70 %, at 40 °C — 78 %.**

**Keywords:** centrifugal separator, liquid droplets, gas flow velocity, similarity criteria, gas flow parameters, two-phase flow, liquid droplet entrainment, passivation.

## Acknowledgements

The research is funded by the Russian Science Foundation No. 23-29-00531.

## References

1. GOST R. 52925-2018. Izdeliya kosmicheskoy tekhniki. Obshchiye trebovaniya k kosmicheskim sredstvam po ogranicheniyu tekhnogennogo zasoreniya okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva [Space technology items. General requirements for space vehicles for near-earth space debris mitigation]. Moscow, 2018. 11 p. (In Russ.).
2. NASA-STD-8719.9. Lifting Standard. URL: <https://standards.globalspec.com/std/13107882/NASA-STD-8719.9> (accessed: 21.04.2024). (In Engl.).
3. IADC-02-01. Space Debris Mitigation Guidelines. URL: <https://newspaceconomy.ca/wp-content/uploads/2022/09/iadc-space-debris-guidelines-revision-2.pdf> (accessed: 21.04.2024). (In Engl.).
4. Trushlyakov V., Urbansky V. Risk reduction of tank explosion based on passivation of unusable propellant residues // Journal of Space Safety Engineering. 2023. Vol. 10, Issue 4. P. 522–530. DOI: 10.1016/j.jsse.2023.09.005. EDN: KQXBNA. (In Engl.).
5. Briot D. Impacts of the Space Debris Mitigation Rules on the Spacecraft Design in Airbus Defence and Space // Proceedings of the 7th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, April 2017 / Eds. T. Flohrer, F. Schmitz. ESA Space Debris Office. URL: <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc7/paper/878/SDC7-paper878.pdf> (accessed: 12.04.2024). (In Engl.).
6. Inoue Ch., Maeda I. On the droplet entrainment from gas-sheared liquid film // Physics of Fluids. 2021. Vol. 33 (1). 011705. DOI: 10.1063/5.0038399. (In Engl.).
7. Minko K. B., Artemov V. I., Yan'kov G. G. [et al.]. Chislennoye modelirovaniye kondensatsii para pri techenii parogazovoy smesi v kanale peremennogo secheniya s puchkom gladkikh gorizonta'nykh trub [Numerical simulation of steam condensation in a steam-gas mixture flow in a variable-section channel with a bundle of smooth horizontal tubes] // Teploenergetika. *Thermal Engineering*. 2019. No. 12. P. 68–76. DOI: 10.1134/S0040363619120063. EDN: AAFLQP. (In Russ.).
8. Minko M. V., Yagov V. V. Modelirovaniye raspredeleniya zhidkosti mezhdru yadrom i plenkoy v adiabatnykh dispersno-kol'tsevykh dvukhfaznykh potokakh [Modeling the distribution of liquid between the flow core and film in adiabatic annular two-phase flows] // Teploenergetika. *Thermal Engineering*. 2014. No. 1. P. 68. DOI: 10.1134/S0040363614010093. EDN RPARCD. (In Russ.).
9. Wang K., Bai B., Ma W. A model for droplet entrainment in churn flow // Chemical Engineering Science. 2013. Vol. 104. P. 1045–1055. DOI: 10.1016/j.ces.2013.10.028. (In Engl.).
10. Berna C., Escrivá A., Muñoz-Cobo J. L. [et al.]. Review of droplet entrainment in annular flow: Interfacial waves and onset of entrainment // Progress in Nuclear Energy. 2014. Vol. 74. P. 14–43. DOI: 10.1016/j.pnucene.2014.01.018. (In Engl.).
11. Zornikov S. A., Isaenkov S. V., Cherdantsev A. V. Axial and azimuthal development of disturbance waves in annular flow in a horizontal pipe // International Journal of Multiphase Flow. 2024. Vol. 172. 104704. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2023.104704. (In Engl.).
12. Durve A. P., Patwardhan A. W. Numerical and experimental investigation of onset of gas entrainment phenomenon // Chemical Engineering Science. 2012. Vol. 73. P. 140–150. DOI: 10.1016/j.ces.2012.01.030. (In Engl.).
13. Mondal A., Sharma S. L. Prediction of entrainment fraction in two-phase gas-liquid co-current annular flow-A machine learning approach // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2024. Vol. 226. 125499. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125499. (In Engl.).
14. Fluent A. Ansys fluent theory guide. Ansys Inc., USA, 2011. P. 724–746. (In Engl.). URL: [https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main\\_pre.htm](https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm) (accessed: 12.04.2024). (In Engl.).
15. Kutateladze S. S., Styrikovich M. A. Gidrodinamika gazozhidkostnykh system [Hydrodynamics of gas-liquid systems] / Ed. by I. V. Volobuyeva, N. M. Peunova. 2nd ed. Moscow, 1972. 296 p. (In Russ.).
16. TEPLOCONTROL-C: pribory regulirovaniya i kontrolya tekhnologicheskikh protsessov [TEPLOCONTROL-C: devices for regulation and control of technological

processes]. URL: <https://teplocontrol-c.ru/katalog/4355.html?ysclid=lr4uhs3ebx282428924> (accessed: 02.03.2024). (In Russ.).

17. Promyshlennaya avtomatizatsiya [Industrial automation]. URL: <https://industrialiation.ru/162727/> (accessed: 02.03.2024). (In Russ.).

18. Promyshlennaya avtomatizatsiya [Industrial automation]. URL: <https://industrialiation.ru/565403/> (accessed: 12.04.2024). (In Russ.).

19. Prodazha i remont kompressornogo oborudovaniya Bezhetskogo zavoda ASO [Sales and repair of compressor equipment by Bezhetsk zavod ASO] // B-Compressor.ru. *B-Compressor.ru*. URL: <https://b-compressor.ru/product/resiverdlya-kompressora-k22?ysclid=lr4uspj9b5528956702> (accessed: 12.04.2024). (In Russ.).

20. A-FLOW F-VF200 Raskhodomery akrilovyye [A-FLOW F-VF200 Flow meters acrylic] // Novyye tekhnologii. *New Technologies*. URL: <https://aflow.nt-rt.ru/price/catalog/164152?ysclid=lr4uw85xrt448164401> (accessed: 12.04.2024). (In Russ.).

21. Laboratornyye vesy VESTA VM-510DM [Laboratory scales VESTA VM-510DM] // Yumeta-Kazan'. *Yumeta-Kazan'*. URL: [https://u-ves.ru/catalog/vesy/laboratornyye\\_vesy/laboratornyye\\_vesy\\_vm\\_510dm/?utm\\_source=yandex](https://u-ves.ru/catalog/vesy/laboratornyye_vesy/laboratornyye_vesy_vm_510dm/?utm_source=yandex) (accessed: 12.04.2024). (In Russ.).

**URBANSKY Vladislav Aleksandrovich**, Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher of Design

of Special on-board Systems of Launch Vehicles and Spacecraft's Research Laboratory, Assistant of Aircraft and Rocket Building Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 2487-9142

ORCID: 0000-0002-8837-7050

AuthorID (SCOPUS): 57214753501

Correspondence address: vladurba95@gmail.com

**PETRUK Anton Andreevich**, Engineer of Design of Special on-board Systems of Launch Vehicles and Spacecraft's Research Laboratory, OmSTU, Omsk.

Correspondence address: apetruk1800@gmail.com

#### For citations

Urbansky V. A., Petruk A. A. Theoretical and experimental studies of the influence of gas flow parameters on the entrainment of liquid droplets from an experimental vessel // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2024. Vol. 8, no. 3. P. 98–106. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-98-106.

Received May 27, 2024.

© V. A. Urbansky, A. A. Petruk