

УДК 533.697.5 / 621.646.79  
DOI: 10.37890/jwt.v68.205

## **Струйная смесительная установка для ввода легкого сыпучего вещества в поток жидкости**

**А.К. Тюльканов<sup>1</sup>**

*ORCID: 0000-0002-9312-5851*

**С.В. Петрашёв<sup>2</sup>**

*ORCID: 0000-0003-3183-5150*

**А.А. Панасенко<sup>2</sup>**

**М.И. Моисеенко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*ООО ВОК, г. Владивосток, Россия*

<sup>2</sup>*МГУ им. адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия*

**Аннотация.** Для ликвидации аварийных разливов нефти предложена судовая система подачи активного вещества в зону загрязнения. В качестве активных веществ могут быть использованы различные химические соединения и вещества, микроорганизмы. Для сбора основной массы нефтяного разлива предложено использовать сорбент терморасщепленный графитовый. Его подача в зону загрязнения должна осуществляться в виде пульпы. Одним из ключевых элементов системы является смеситель для ввода сорбента в поток воды. В работе представлены результаты трех этапов исследования влияния геометрических параметров струйного смесителя на среднее объемное содержания сорбента в пульпе, а также формы сопла и показателей потока рабочей жидкости. Отмечена необходимость обязательного использования в бункере с легким сорбентом устройства разрушения свода.

**Ключевые слова:** морские нефтегазовые сооружения, северный морской путь, разлив нефти, сорбент, пульпа, струйный смеситель, сорбент термо-расщепленный графитовый, ледовый покров.

## **Jet mixing unit for introducing a light bulk substance into a liquid stream**

**Artur K. Tyulkanov<sup>1</sup>**

*ORCID: 0000-0002-9312-5851*

**Sergey V. Petrashev<sup>2</sup>**

*ORCID: 0000-0003-3183-5150*

**Andrey A. Panasenko<sup>2</sup>**

**Mikhail I. Moiseenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*VOK Ltd, Vladivostok, Russia*

<sup>2</sup>*Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoi, Vladivostok, Russia*

**Abstract.** For the oil spill emergency response, a ship system for supplying an active substance to the contaminated zone has been proposed. Various chemical compounds and substances, microorganisms can be used as active substances. To collect most of the oil spill, it was proposed to use a thermally split graphite sorbent. Its supply to the contaminated zone should be carried out in the form of a pulp. One of the key system elements is a mixer for introducing the sorbent into the water flow. This article presents the results concerning the three stages of the study in relation to the influence of the jet mixer geometric parameters on the average sorbent volumetric content in the pulp, the nozzle shape and the working fluid flow. The necessity of arch destruction device mandatory use in a bunker with a light sorbent is noted.

**Keywords:** offshore oil and gas facilities, northern sea route, oil spill, sorbent, pulp, jet mixer, thermo-split graphite sorbent, ice cover.

**Введение**

В последние годы в полярных морях России постоянно растёт грузооборот, увеличивается количество объектов добычи углеводородов, судов, проходящих северным морским путем, а также количество работ, связанных с погрузкой (разгрузкой) нефтяных грузов. Все это многократно увеличивает вероятность аварийных разливов нефти. В полярных морях поверхность покрыта льдом более 7 месяцев в году [1], что сильно затрудняет, а в ряде случаев делает невозможным непосредственный доступ к нефтяному пятну. Для ликвидации последствий аварийных разливов в МГУ им. адм. Г.И. Невельского предложена система подачи активного вещества (СПАВ) в зону загрязнения [2]. Схема системы представлена на рисунке 1. В качестве активных веществ могут подаваться специальные химические соединения, микроорганизмы, окислители, диспергенты, сорбенты и др.

В состав СПАВ входит: насос, смесительное устройство, трубопроводы, кран-распределитель, гибкий рукав, гидромонитор, подводное устройство-распылитель. Для ликвидации обнаруженного нефтяного пятна под воду (под ледовый покров, сплошной или битый) погружается подводное устройство – распылитель активного вещества 7. К нему от насоса 1 по трубопроводу 3 и гибкому рукаву 5, через кран-распределитель 4 поступает морская вода. Подводное устройство-распылитель является самоходным гидрореактивным устройством с двумя соплами [3]. Выпуск большого количества воды через сопла вызывает появление реактивной тяги и перемещение устройства-распылителя к нефтяному пятну. При достижении последнего подключается смесительное устройство и в поток морской воды вводится активное вещество. Подводный выпуск плавучего сорбирующего вещества позволяет провести сбор частиц нефти в тоще воды, на ее поверхности или подо льдом.

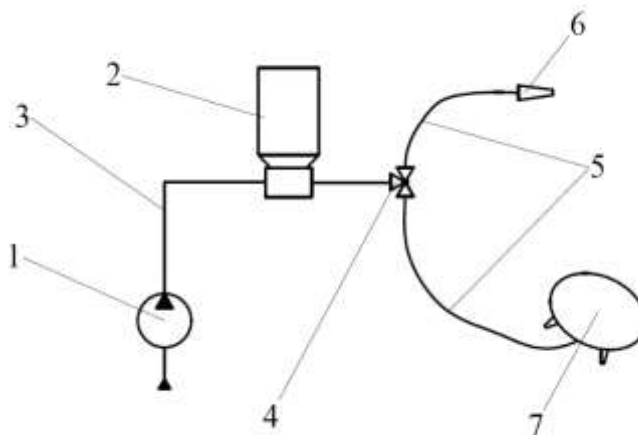


Рис. 1. Схема системы подачи активного вещества в зону загрязнения  
 1 - насос, 2 - смесительное устройство, 3 - трубопровод, 4 - кран-распределитель,  
 5 - гибкий рукав, 6 - гидромонитор, 7 - подводное устройство-распылитель

Fig. 1. The system for supplying an active substance to the contaminated zone diagram  
 1 - pump, 2 – mixing unit, 3 - pipeline, 4 - distributor valve, 5 - flexible hose, 6 - hydromonitor,  
 7 - underwater spray unit

Анализ различных вариантов активного вещества показал, что на первоначальном этапе обработки нефтяного пятна с помощью систем подобного типа предпочтительно использовать сорбент [4, 5] терморасщепленный графитовый (СТРГ). Если зона загрязнения не имеет ледового покрова и находится в пределах 20 – 25 м от гидромонитора 6, то кран-распределитель переключается на подачу пульпы с сорбентом через гидромонитор.

Как видно из конструкции СПАВ, основными ее ключевыми элементами являются смесительное устройство и подводное устройство–распылитель. Последнее в данной работе не рассматривается. После анализа особенностей, преимуществ и недостатков различных типов конструкции смесительного устройства был выбран вариант струйного эжектора.

Проектирование струйного смесителя - многоплановая междисциплинарная задача из областей гидромеханики, термодинамики, теоретической механики и экологии. Дополнительную сложность добавляют свойства сорбента марки СТРГ: 100%-ая плавучесть, олеофильность, химическая инертность, гидрофобность, размер расщепленных гранул от 1 до 2,5 мм, насыпная плотность до 12 кг/м<sup>3</sup>, высокая скорость сорбции - пленка нефти толщиной 3 мм адсорбируется на 99,5% за 10 с [5], сложная пространственная структура гранул сорбента. Для перемещения большого объема легких сыпучих веществ подобных СТРГ обычно используется пневмотранспорт. В нашем случае возникла необходимость ввести сорбент СТРГ в поток морской воды. В этом случае перемещаемое вещество оказывается более чем в 80 раз легче, чем транспортирующая среда.

Цель настоящей статьи – представить результаты исследования струйного смесителя для легкого сыпучего вещества и жидкости с большой разностью плотностей между ними.

В данное время методических рекомендаций по расчету параметров струйного смесителя для легкого сыпучего сорбента и воды нет. Соответственно, решение этой проблемы является актуальной.

### **Методика эксперимента**

Экспериментальные исследования струйного смесителя проводились на модели, выполненной в масштабе 1:2. При работающем струйном смесителе из потока воды с сорбентом отбирались пробы объемом от 0,0005 до 0,0011 м<sup>3</sup>. Сразу после отбора определялся общий объем смеси. Методом фильтрования из общего объема отделялась вода и измерялся ее объем. Количество сорбента в пробе полученной пульпы определялось как разница общего объема и отфильтрованной воды. Серия экспериментов включала три последовательных этапа.

Первый: трехфакторные экспериментальные исследования влияния геометрических параметров струйного смесителя (длина входа сопла в приемную камеру, длина камеры смещения) и числа Рейнольдса на свойства струйного смесителя. Предварительно длина входа сопла в приемную камеру рассчитана с учетом данных представленных в [6, 7, 8].

Второй: исследование влияния формы сопла на свойства струйного смесителя с наиболее эффективным сочетанием геометрических параметров, выявленном на первом этапе. Сравнивались достигнутые значения параметров смесителей с круглым и щелевым соплами, учитывались данные как отечественных, так и зарубежных исследователей [9, 10,]

Третий: исследование влияния числа Рейнольдса на свойства струйного смесителя с плоским щелевидным соплом и наиболее эффективным сочетанием геометрических параметров, выявленном на первом этапе.

**Первый этап.**

Для определения наиболее эффективного сочетания геометрических параметров струйного смесителя и чисел Рейнольдса построена матрица планирования 3-х факторного эксперимента [11, 12, 13]. В качестве изменяемых факторов приняты:

X1 – число Рейнольдса в потоке активной жидкости (изменялось от 59000 до 66500, диаметр круглого сопла – 0,0055 м;

X2 – длина камеры смешения, изменялась в диапазоне от 0,024 до 0,145 м, диаметр камеры смешения 0,026м;

X3 – Длина входа сопла в приемную камеру, изменялось в диапазоне от 0,04 до 0,102 м, длина приемной камеры 0,105 м.

В предварительных опытах выявлено возникновение развитого сводообразования. Устранение этого явления обеспечено использованием вибрационного метода сводоразрушения.

Для уменьшения влияния внешней среды и неконтролируемых факторов внутри каждой серии опытов обход точек факторного пространства проводился случайным образом, т.е. рандомизировалась последовательность опытов [14, 15]. В соответствии с теорией планирования эксперимента назначена стандартная серия из 8 замеров [16, 13]. Матрица планирования представлена в табличной форме (табл. 1). Знак «+» соответствует максимальному значению указанного фактора, «-» – минимальному.

Таблица 1

**Матрица эксперимента**

Вариант сочетания факторов	Изменяемые факторы		
	X1 Число Рейнольдса (Re)	X2 Длина камеры смешения	X3 Длина входа сопла в приемную камеру
1	+	+	+
2	+	+	-
3	+	-	+
4	+	-	-
5	-	+	+
6	-	+	-
7	-	-	+
8	-	-	-

Результаты экспериментов по влиянию геометрических параметров струйного смесителя и числа Рейнольдса на свойства эжектора в соответствии с матрицей планирования эксперимента представлены в (табл. 2).

Таблица 2

**Результаты измерения влияния геометрических параметров и числа Re активной жидкости на свойства струйного смесителя**

Вариант сочетания факторов	Общий объем смеси, см <sup>3</sup>	Объем воды, см <sup>3</sup>	Объем сорбента, см <sup>3</sup>	Объемное содержание сорбента, %	Среднее объемное содержание сорбента, ф, %
1	1098	986	112	10,2	10,85
	965	854	111	11,5	
	987	883	104	10,52	
	896	794	102	11,39	
	913	816	97	10,64	

2	826	690	136	16,46	15,79
	650	558	92	14,15	
	917	760	153	16,76	
	987	837	150	15,16	
	864	722	142	16,42	
3	710	643	67	9,44	7,97
	631	590	41	6,5	
	886	818	68	7,65	
	928	850	78	8,37	
4	794	731	63	7,91	15,46
	650	558	92	14,15	
	913	760	153	16,76	
	938	799	139	14,84	
	874	732	142	16,23	
5	862	730	132	15,31	10,36
	710	643	67	9,44	
	665	590	75	11,28	
	823	741	82	9,95	
	927	826	101	10,88	
6	887	796	91	10,24	12,22
	570	507	63	11,05	
	583	505	78	13,38	
	794	701	93	11,73	
	662	577	85	12,83	
7	726	637	89	12,31	7,36
	841	786	55	6,54	
	728	668	60	8,24	
	867	806	61	7,07	
	764	705	59	7,73	
8	908	842	66	7,23	8,80
	713	661	52	7,29	
	728	653	75	10,3	
	836	765	71	8,45	
	891	809	82	9,24	
	754	688	66	8,73	

### Второй этап

На втором этапе проводилось исследование влияния формы сопла на свойства струйного смесителя с наиболее эффективным сочетанием геометрических параметров, выявленном на первом этапе. Исследовалось два типа сопел – сходящееся коническое, диаметром на выходе – 0,0055 м и плоское щелевое с размерами 0,0015×0,016 м (площадью проходного сечения примерно соответствует коническому соплу –  $2,4 \times 10^{-5} \text{ м}^2$ ). Продольное сечение щелевого сопла представлено на рисунке 2. Сопло изготовлено методом печати на 3D-принтере из пластика марки ABS. Внутренняя поверхность сопла дополнительно отшлифована.

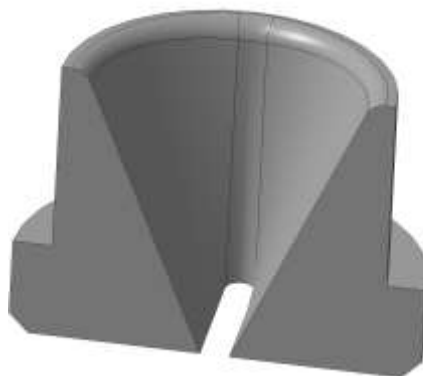


Рис. 2. Продольное сечение плоского щелевого сопла

Fig. 2. A flat slotted nozzle longitudinal section

При исследовании влияния формы сопла на свойства струйного смесителя использовалась пресная вода. Рабочая жидкость подавалась через сопла конической сходящейся формы и плоское щелевое. Замеры проводились на расходах с частичной подачей воды. Числа Рейнольдса для конического сходящегося и плоского щелевого сопел имели величины 58763 и 58874 соответственно. Для плоского щелевого сопла режим подобран близким к аналогичному с коническим сходящимся соплом. Данные замеров для конического сходящегося и плоского щелевого сопел представлены ниже (табл. 3).

Таблица 3

**Влияния формы сопла на свойства струйного смесителя**

Вариант сочетания факторов	Общий объем смеси, см <sup>3</sup>	Объем воды, см <sup>3</sup>	Объем сорбента, см <sup>3</sup>	Объемное содержание сорбента, %	Среднее содержания сорбента, ф, %
Коническое сходящееся сопло при Re=58763					
1	989	879	110	12,51	14,61
2	965	854	111	13,00	
3	1084	930	154	16,32	
4	752	658	94	14,29	
5	895	768	127	16,54	
6	1135	985	150	15,23	
7	784	688	96	13,95	
8	1098	954	144	15,09	
9	874	765	109	14,25	
10	812	713	99	13,88	
Плоское щелевое сопло при Re=58874					
1	965	765	200	26,14	27,64
2	982	765	217	28,37	
3	976	752	224	29,79	
4	649	520	129	24,81	
5	746	587	159	27,09	
6	653	512	141	27,54	
7	587	453	134	29,58	
8	1132	875	257	29,37	

Вариант сочетания факторов	Общий объем смеси, см <sup>3</sup>	Объем воды, см <sup>3</sup>	Объем сорбента, см <sup>3</sup>	Объемное содержание сорбента, %	Среднее содержания сорбента, ф, %
9	823	647	176	27,20	
10	854	675	179	26,52	

### Третий этап

На третьем этапе исследовалось влияния числа Рейнольдса на свойства струйного смесителя. Испытывался смеситель с плоским щелевым соплом и наиболее эффективным сочетанием геометрических параметров, которое было выявлено на первом этапе. Подача рабочей жидкости осуществлялась с рядом частичных и максимальной подачами воды, числа Рейнольдса изменялись от 32456 до 66496. Результаты замеров параметров с плоским соплом и различными значениями числа Рейнольдса, представлены в табличном виде (табл. 4). Графическая зависимость содержания сорбента в водяной пульпе от числа Рейнольдса для плоского сопла представлена в виде графика на рисунке 3.

### Анализ полученных результатов и выводы

В результате первого этапа экспериментальных исследований влияния геометрических параметров струйного смесителя и чисел Рейнольдса на содержание в полученной пульпе сорбента установлено, что наибольшее влияние оказывает длина входа сопла в приемную камеру. При минимальной величине данного параметра обеспечивается максимальная площадь контакта водяной струи с окружающим сорбентом. Максимальная величина среднего объемного содержания сорбента (ф) зафиксирована в 15,79 %.

При максимальных значениях Re среднее объемное содержания сорбента лежало в диапазоне от 7,36 до 10,85 %. При более низких величинах Re и равных прочих условиях содержание сорбента в пульпе зафиксировано в диапазоне от 8,80 до 15,79 %, что выше на 16 – 48 %.

Длина камеры смешения оказывает заметно меньшее влияние на эффективность захвата сорбента потоком жидкости.

Таблица 4

### Результаты измерений влияния Re на свойства струйного смесителя

Re	Номер эксперимента										Среднее объемное содержание сорбента ф, %
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	Объемное содержание сорбента, %										
66327	31,8	29,6	27,5	22,3	30,2	24,8	33,8	32,6	31,4	25,6	28,96
62456	32,5	34,8	31,2	34,2	37,7	31,2	32,5	36,8	38,2	32,1	34,12
58943	37,3	37,9	38,2	40,1	36,9	32,9	39,5	40,2	38,5	41,5	38,30
56325	41,2	38,9	39,2	37,6	41,3	35,8	34,6	43,8	44,2	39,9	39,65
51896	33,2	37,5	43,2	45,0	35,9	36,2	42,8	44,2	33,8	39,5	39,13
47891	35,8	37,5	37,5	35,8	38,6	36,9	36,8	41,7	35,9	36,7	37,32
43869	29,4	38,4	31,0	35,9	31,0	31,8	35,2	30,8	37,2	31,2	33,19

37342	21,5	25,7	23,2	29,5	21,8	21,5	26,5	20,6	25,3	27,5	24,31
32456	20,5	18,9	21,3	18,9	20,0	19,5	20,3	17,5	21,6	17,5	19,60

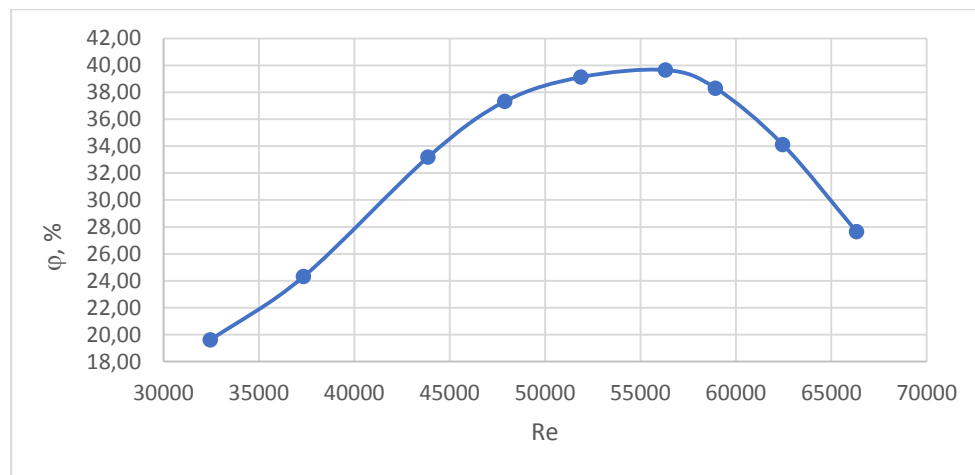


Рис.3. Содержание сорбента в пульпе в зависимости от числа Рейнольдса

Fig. 3. Sorbent content in the pulp depending on the Reynolds number

По результатам второго этапа можно сделать вывод, что по сравнению с коническим соплом использование плоского щелевого горизонтально ориентированного дает существенное увеличение среднего объемного содержания сорбента в пульпе. Так, при близких значениях чисел Рейнольдса (58763 и 58874) значение φ увеличилось на 89,2%, с 14,61% при использовании конического сходящегося сопла до 27,64% у плоского щелевого.

В результате третьего этапа экспериментальных исследований получена эмпирическая графическая зависимость содержания сорбента в пульпе от чисел Рейнольдса (рис. 3) для плоского щелевого сопла при наиболее благоприятном сочетании геометрических параметров струйного смесителя. Наиболее близкий к экспериментальным значениям результат аппроксимации данных получен при использовании полиномиальной зависимости четвертой степени, величина достоверности аппроксимации составила R2=0,9998:

$$\varphi = 5 \times 10^{-17} Re^4 - 1 \times 10^{-11} Re^3 + 9 \times 10^{-7} Re^2 - 0,0277 Re + 322,27$$

Максимальное значение аппроксимирующей зависимости достигается при числах Рейнольдса около 54000. При больших значениях Re наблюдается падение среднего объемного содержания сорбента в пульпе.

### Заключение

Полученные в результате исследования эмпирические зависимости и закономерности позволяют более точно решить частную задачу создания струйного смесителя для ввода в поток воды легкого сыпучего вещества - сорбента типа СТГ. Установлена необходимость обязательного применения устройства для разрушения свода в бункерном устройстве. На основе полученных данных запатентовано два технических решения, направленных на повышение объемного содержания сорбента в получаемой пульпе [17, 18].



Дальнейшие исследования направлены на более глубокий анализ полученных результатов, их использование для разработки новых технических решений.

#### Список литературы

1. Astafiev V.N., Truskov P.A., Polomoshnov A.M. Sea Ice Investigation on Sakhalin Offshore. Proc.5 International Symp.on Okhotsk Sea & Sea Ice. Mombetsu, Japan, 3-5 February 1990, pp.163-171.
2. Тюльканов А.К., Петрашев С.В., Моисеенко М.И., Перехода И.А., Куренский А.В. Новая судовая система как способ обеспечения экологической безопасности в условиях арктического шельфа // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2021. № 1(46). С. 63–69. DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2021-1-6>
3. Пат. 144489U1, Российская Федерация, МПК E02B 15/04, E02B 15/10. Устройство для подводного введения сорбента / Петрашёв С.В., Городников О.А., Монинец С.Ю.; заявитель и патентообладатель Монинец С.Ю. (RU). – № 2013147318/13; заявл. 09.01.2014; опубл. 20.08.2014 Бюл. № 23.
4. The use of sorbents in oil spill response, technical information document. ITOPF Ltd. Produced by Impact PR & Design Limited. Canterbury, UK, 2012.
5. ТУ 2164-001-05015070-97 «Сорбент терморасщепленный графитовый».
6. Темнов В. К. О влиянии положения сопла на характеристики жидкостного эжектора /Известие вузов. Сер. Машиностроение. - 1975.
7. A. A. A. Sheha, M. Nasr, M. A. Hosien, E. M. Wahba. Computational and Experimental Study on the Water-Jet Pump Performance/ Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 11, No. 4, pp. 1013-1020, 2018. Available online at [www.jafmonline.net](http://www.jafmonline.net), ISSN 1735-3572, EISSN 1735-3645. DOI: 10.29252/jafm.11.04.28407
8. R Yapıcı, K Aldas. Optimization of water jet pumps using numerical simulation. Journal of Power and Energy Part A: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2013 227: 438 originally published online 4 June 2013. DOI: 10.1177/0957650913487529
9. Yukitaka Yamazaki, Atsushi Yamazaki, Tadashi Narabayashi, Junya Suzuki, Toshihiko Shakouchi. Studies on Mixing Process and Performance Improvement of Jet Pumps (Effect of Nozzle and Throat Shapes)/ Journal of Fluid Science and Technology, Vol.2, No.1, 2007, p.238-247. DOI: 10.1299/jfst.2.238
10. Битюцких С.Ю. Исследование и расчет гидроструйного насоса-смесителя: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2018. 161 с.
11. Шашков В.Б. Прикладной регрессионный анализ. Многофакторная регрессия. Оренбург, ГОУ ВПО ОГУ, 2003.
12. Miryam Barad. Design of Experiments (DOE)—A Valuable Multi-Purpose Methodology. Applied Mathematics, 2014, 5, p. 2120-2129. Published Online July 2014 Applied Mathematics, 2014, 5, 2120-2129 Published Online July 2014 in SciRes. <http://www.scirp.org/journal/am> <http://dx.doi.org/10.4236/am.2014.514206> DOI: 10.4236/am.2014.514206
13. Mubashir Siddiqui, Kai Yang Adaptive sequential experimentation technique for 3 factorial designs based on revised simplex search/ International Journal of Experimental Design and Process Optimisation, 2010 Vol.1 No.4, pp.296 – 314 DOI: 10.1504/IJEDPO.2010.034987
14. Батурина Н.Ю. Автоматизация планирования эксперимента // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 11–4(53). С. 14–17.
15. Simon T. Bate, Marion J. Chatfield. Identifying the Structure of the Experimental Design/ Journal of Quality Technology, Volume 48, 2016 p.p. 343-364. / Published online: 21 Nov 2017 DOI:10.1080/00224065.2016.11918173
16. Рудакова Т.И., Осинцев Е.Г., Осинцева Д.В. Методика планирования эксперимента и обработка статистических данных // Инновационные технологии в подготовке современных профессиональных кадров: опыт, проблемы: сб. науч. тр. Челябинск: Изд-во Челябинского филиала РАН-ХиГС, 2016. С. 115–120.
17. Пат. 2680079 С1, Российская Федерация, МПК B01F 3/12 B01F 5/04. Смесительная установка струйного типа / Петрашёв С.В., Тюльканов А.В., Самойленко Ю.Р.; заявитель и патентообладатель ВГУЭС (RU). – № 2018106217; заявл. 19.02.2018; опубл. 14.02.2019, Бюл. № 5.
18. Пат. 2722993 С1, Российская Федерация, МПК B01F 3/12. Смесительная установка струйного типа с кольцевым соплом/ Петрашёв С.В., Тюльканов А.В., Гриванова О.В.,

Моисеенко М.И.; заявитель и патентообладатель ВГУЭС (RU). – № 2019143536.; заявл. 20.12.2019; опубл. 05.06.2020 Бюл. № 16

### References

1. Astafiev V.N., Truskov P.A., Polomoshnov A.M. Sea Ice Investigation on Sakhalin Offshore. Proc.5 International Symp.on Okhotsk Sea & Sea Ice. Mombetsu, Japan, 3-5 February 1990, pp.163-171.
2. Tulkanov A.K., Petrashev S.V., Moiseenko M.I., Perekhoda I.A., Kurenskiy A.V. Novaya sudovaya sistema kak sposob obespecheniya ehkologicheskoi bezopasnosti v usloviyakh arkticheskogo shel'fa [New ship system as a way to ensure environmental safety in the Arctic shelf]// Vestnik Inzhenernoi shkoly DVFU [FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN]. 2021. № 1(46). pp. 63–69. (In Russ.). DOI: 10.24866/2227-6858/2021-1-6
3. Patent 144489U1, Russia, IPC E02B 15/04, E02B 15/10. Ustroistvo dlya podvodnogo vvedeniya sorbenta [Device for underwater injection of sorbent] / Petrashev S.V., Gorodnikov O.A., Moninets S.Yu.; applicant and patentee Moninets S.Yu. (RUS). – № 2013147318/13; announced 09.01.2014; published 20.08.2014 Bulletin No. 23. (In Russ.).
4. The use of sorbents in oil spill response, technical information document. ITOPI Ltd. Produced by Impact PR & Design Limited. Canterbury, UK, 2012.
5. TU 2164-001-05015070-97. Sorbent termorasscheplynniy grafitovyy [Thermally-split graphite sorbent]. (In Russ.).
6. Temnov V. K. O vliyaniy polozeniya sopla na kharakteristiki zhidkostnogo ehzhektora.[ On the influence of the position of the nozzle on the characteristics of a liquid ejector] / Izvestie vuzov. Ser. Mashinostroenie. [News of universities. Ser. Mechanical engineering]. - 1975. (In Russ.).
7. A. A. A. Sheha, M. Nasr, M. A. Hosien, E. M. Wahba. Computational and Experimental Study on the Water-Jet Pump Performance/ Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 11, No. 4, pp. 1013-1020, 2018. Available online at [www.jafmonline.net](http://www.jafmonline.net), ISSN 1735-3572, EISSN 1735-3645. DOI: 10.29252/jafm.11.04.28407
8. R Yapici, K Aldas. Optimization of water jet pumps using numerical simulation. Journal of Power and Energy Part A: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2013 227: 438 originally published online 4 June 2013. DOI: 10.1177/0957650913487529
9. Yukitaka Yamazaki, Atsushi Yamazaki, Tadashi Narabayashi, Junya Suzuki, Toshihiko Shakouchi. Studies on Mixing Process and Performance Improvement of Jet Pumps (Effect of Nozzle and Throat Shapes)/ Journal of Fluid Science and Technology, Vol.2, No.1, 2007, p.238-247. DOI: 10.1299/jfst.2.238
10. Bityutskikh S.Y. Issledovanie i raschet gidrostruinoogo nasosa-smesitelya [Research and calculation of a hydraulic jet pump-mixer]: dis. Cand. tech. sciences. Chelyabinsk, 2018. p. 161. (In Russ.).
11. Shashkov V.B. Prikladnoi regressiynnyi analiz. Mnogofaktornaya regressiya. [Applied regression analysis. Multifactors regression]. Orenburg, Orenburg State University, 2003. (In Russ.).
12. Miryam Barad. Design of Experiments (DOE)—A Valuable Multi-Purpose Methodology. Applied Mathematics, 2014, 5, p. 2120-2129. Published Online July 2014 Applied Mathematics, 2014, 5, 2120-2129 Published Online July 2014 in SciRes. <http://www.scirp.org/journal/am> <http://dx.doi.org/10.4236/am.2014.514206> DOI: 10.4236/am.2014.514206
13. Mubashir Siddiqui, Kai Yang Adaptive sequential experimentation technique for 3 factorial designs based on revised simplex search/ International Journal of Experimental Design and Process Optimisation, 2010 Vol.1 No.4, pp.296 – 314 DOI: 10.1504/IJEDPO.2010.034987
14. Baturina N.Y. Avtomatizatsiya planirovaniya ehksperimenta [Automation of planning of eksperimen] // International Research Journal. 2016. № 11–4(53). pp. 14–17. (In Russ.). DOI: 10.18454/IRJ.2016.53.161
15. Simon T. Bate, Marion J. Chatfield. Identifying the Structure of the Experimental Design/ Journal of Quality Technology, Volume 48, 2016 p.p. 343-364. / Published online: 21 Nov 2017 DOI:10.1080/00224065.2016.11918173
16. Rudakova T.I., Osintsev E.G., Osintseva D.V. Metodika planirovaniya ehksperimenta i obrabotka statisticheskikh dannykh [Methods of experimental design and processing of statistical DAT] // Innovatsionnye tekhnologii v podgotovke sovremennykh professional'nykh kadrov: opyt, problem [Innovative technologies in the preparation of today's professionals: experience, problems.] Collected academic works. - Chelyabinsk: Chelyabinsk branch of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, 2016. - pp. 115–120. (In Russ.). ISBN 978-5-91970-052-4]

17. Patent 2680079 C1, Russia, IPC B01F 3/12 B01F 5/04. Smesitel'naya ustanovka struinogo tipa s kol'tsevym soplom [Mixing plant of jet type] / Petrashev S.V., Tyulkanov A.V., Samoilenko Yu.R. ; applicant and patentee Vladivostok State University of Economics and Service (RUS). - No. 2018106217; announced 02/19/2018; published 02/14/2019, Bulletin No. 5. (In Russ.).

18. Patent 2722993 C1, Russia, IPC B01F 3/12. Smesitel'naya ustanovka struinogo tipa s kol'tsevym soplom [A jet-type mixing plant with an circular nozzle] / Petrashev S.V., Tyulkanov A.K., Grivanova O.V., Moiseenko M.I. ; applicant and patentee Vladivostok State University of Economics and Service (RUS). - No. 2019143536, announced 12/20/2019; published 06/05/2020 Bulletin No. 16. (In Russ.).

#### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Тюльканов Артур Константинович**, ведущий специалист по мультимодальным перевозкам, ООО ВСК, г. Владивосток, e-mail: saint\_sus25@mail.ru

**Artur K. Tyulkanov**, leading specialist in multimodal transportation, VOK Ltd, Vladivostok, Russia, e-mail: saint\_sus25@mail.ru

**Петрашев Сергей Владимирович**, к.т.н., доцент, профессор кафедры теории и устройства судна, МГУ им. адм. Г.И. Невельского. г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: petrashov@msun.ru

**Sergey V. Petrashev**, PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Theory and Vessel Construction Department, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoi. 690059, 50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, Russia, e-mail: petrashov@msun.ru

**Панасенко Андрей Александрович**, к.т.н., доцент, доцент кафедры эксплуатации автоматизированных судовых энергетических установок МГУ им. адм. Г.И. Невельского. г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: AAPanasenko@msun.ru

**Andrey A. Panasenko**, PhD in Engineering Science, Associate Professor of Ship's Power Plants Automation Department, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoi. 690059, 50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, Russia, e-mail: AAPanasenko@msun.ru.

**Моисеенко Михаил Игоревич**, аспирант кафедры теории и устройства судна, МГУ им. адм. Г.И. Невельского. г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а, e-mail: misha.moiseenko.94@mail.ru

**Mikhail I. Moiseenko**, Postgraduate Student of the Theory and Vessel Construction Department, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoi. 690059, 50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, Russia, , e-mail: misha.moiseenko.94@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 08.06.2021; опубликована онлайн 15.09.2021  
Received 08.06.2021; published online 15.09.2021