

УДК 66.02. (075.32)

О.М. БУГАЕНКО, Н.В. НЕЧИПОРУК, Ю.А. ГУСЕВ, В.С. ЧИГРИН

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

МЕХАНИЗМЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ БИОСОРБЕНТА В РАЗГОННОМ УСТРОЙСТВЕ МНОГОФАЗНОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА

Рассмотрены вопросы исследования методов и устройств дополнительного диспергирования двухфазного потока биосорбента газогенератора, обеспечивающего создание прогрессивной технологии сбора нефти и нефтепродуктов с поверхности воды и грунта при их аварийных разливах. Предложена схема газодинамического дробления и разгона жидкости. Представлены экспериментальные исследования дисперсности жидкости двухфазного потока с использованием дополнительной паровой фазы, углекислого газа и струнного диспергатора. Приведен анализ результатов экспериментальных исследований.

Ключевые слова: двухфазный поток, биосорбент, газогенератор, разгонное устройство, газодинамическое дробление, струнный диспергатор.

Постановка задачи

Нефть и нефтепродукты являются одними из самых существенных загрязнителей, нарушающих экологию мирового океана, водотоков и водоемов, а также почвенных покровов суши.

Прогрессивные технологии очистки воды и почвы от нефтепродуктов включают в себя распределение по загрязненной поверхности мелкодисперсного препарата, содержащего нефтеокисляющие бактерии.

Ликвидация загрязнения обширных водных акваторий и грунта нефтепродуктами требует использования специальных установок и технологий доставки, распределения сорбента и биопрепарата на больших загрязненных поверхностях в течение короткого времени.

Известен многофазный генератор, разгонное устройство (РУ) которого обеспечивает доставку мелкодисперсного потока биосорбента на загрязненную нефтепродуктами поверхность [1, 2].

Принципиальная схема разработанной экспериментальной установки двухфазного разгонного устройства на базе газотурбинного двигателя включает следующие элементы (рис. 1):

- газотурбинный двигатель;
- систему подачи биосорбента;
- двухфазное разгонное устройство (ДРУ).

Газовый поток двигателя, поступая в камеру смешения разгонного устройства, исполняет роль несущей фазы многофазного разгонного устройства (МРУ).

Водная эмульсия биосорбента из емкости с помощью центробежного насоса поступает в прием-

ную камеру ДРУ, а затем в сопло, которое осуществляет ее дробление и разгон.



Рис. 1. Принципиальная схема установки

Двухфазное РУ схематично изображено на рис. 2. Его работа может быть представлена следующим образом. Через входной патрубок РУ (сечение 0-0) газ с определенными параметрами (G_{Γ}^* , P_{Γ}^* , W_{Γ}^* , T_{Γ}^* – расход, давление, скорость, температура газового потока соответственно) попадает в смеситель, туда же через форсунки поступает и жидкость.

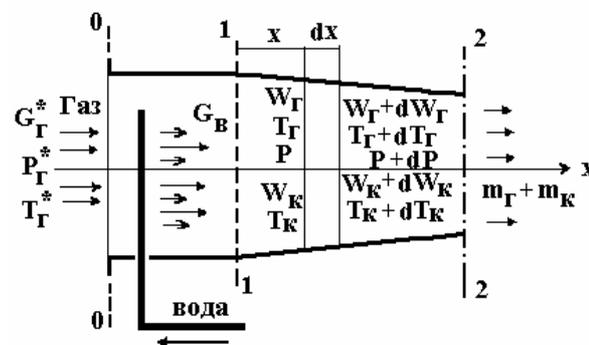


Рис. 2. Схема газодинамического дробления и разгона жидкости

В смесителе компоненты распределяются таким образом, чтобы на выходе из него (сечение 1-1) обеспечить развитую поверхность контакта фаз (P_g , W_g , T_g – давление, скорость, температура газовой фазы, W_k , T_k – скорость и температура капли соответственно). В дальнейшем смесь газа и жидкости расширяется в профилированном канале. Участок между сечениями 1-1 и 2-2 образует собственно двухфазное сопло, в котором осуществляется энергообмен между газом и жидкостью. При этом происходит дробление жидкости. Под действием градиента давления, как газ, так и жидкость ускоряются и истекают из сопла.

Технология применения биосорбентов при ликвидации нефтяных загрязнений водной поверхности и грунта с применением рассматриваемого газогенератора предполагает их доставку в виде эмульсионных водных растворов. Разгонное устройство двухфазного газогенератора позволяет получать потоки сорбента, имеющие размер капель жидкой фазы $\approx 100 - 150$ мкм. Необходимо отметить, что от размера капель зависят такие технологические параметры многофазного газогенератора, как дальность и площадь орошения сорбентным потоком загрязненной нефтепродуктами поверхности, а также глубина проникновения биосорбента в грунт при решении задачи его очистки от нефтепродуктов. При очистке грунта для более экономного расходования биопрепарата и обеспечения его глубинного проникновения в зараженную поверхность возникает необходимость получения сорбентного потока с меньшим размером капель.

Улучшение дробления жидкой фазы сорбента может быть осуществлено за счет предварительного испарения воды, подаваемой через специальную форсунку перед входом в приемную камеру устройства. Дробление в этом случае обеспечивается за счет использования более энергоемкого рабочего тела парогазовой смеси, имеющей термодинамические свойства, близкие к свойствам идеального газа [3].

При использовании в качестве рабочего тела парогазовой смеси в систему уравнений для расчета параметров на срезе сопла двухфазного разгонного устройства необходимо внести ряд корректировок, учитывающих изменение термодинамических параметров парогазовой смеси.

В частности, газовая постоянная смеси может быть рассчитана по формуле:

$$R = 8314,3/\mu,$$

где μ – кажущийся молекулярный вес смеси, который определяется как

$$\mu = \sum \tau_i \mu_i \text{ или } \mu = \sum n_i \mu_i, n_i = M_i/M = V_i/V = \tau_i;$$

M_i – число молей i -го компонента;

$M = \sum M_i$ – число молей всей смеси;

$V_i = V P_i/P$ – парциальный объем i -го компонента;

P_i – парциальное давление i -го компонента, при этом полное давление $P = \sum P_i$.

Теплоемкость смеси

$$C_{p\text{ см}} = \sum q_i C_{p_i}, C_{v\text{ см}} = \sum q_i C_{v_i},$$

где q_i – массовое количество i -го компонента.

Тогда показатель адиабаты смеси

$$K_{\text{см}} = C_{p\text{ см}}/C_{v\text{ см}}.$$

Теоретические расчеты показывают, что при одинаковых параметрах газового потока, одинаковой геометрии разгонного устройства, одинаковой скорости подачи воды и одинаковых коэффициентах проскальзывания жидкой и газовой сред диаметр капель на выходе получается на 19% меньше при использовании паровой фазы, чем без ее использования.

При этом несколько меняется показатель Вебера, что, по всей видимости, и вызывает дополнительное дробление капель. Показатель Вебера

$$We = Re^2/Lp_1,$$

где Re и Lp_1 – числа Рейнольдса и Лапласа для несущей фазы:

$$Lp_1 = \rho_1 d_k \sigma / \mu_1^2 \text{ – число несущей фазы;}$$

d_k – диаметр капли;

σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости;

μ_1 – вязкость несущей фазы;

ρ_1 – плотность газа, зависящая от насыщения его паром.

Дробление начинается при $We < 23$ и заканчивается при $We > 5$, но возможно дробление и при меньших величинах We при срывном и деформационном разрушении капель, которое имеет место при истечении из струйной форсунки.

Дробление капель жидкой фазы сорбента с использованием углекислого газа возможно при предварительном насыщении водной эмульсии биосорбента углекислым газом под давлением. Резкое снижение давления в жидкой струе, насыщенной углекислотой, при выходе ее из форсунки приводит к выделению пузырьков углекислого газа, что вызывает механическое дробление капель, как при эффекте пузырькового кипения.

Вероятный механизм дробления капель может быть следующим: возникающий газовый пузырек очень малого диаметра колеблется по радиусу с частотой, рассчитываемой по формуле Миннаэрта

$$f = \frac{1}{2\pi a_0} \sqrt{\frac{3n\rho_0}{\rho_1^0}}$$

где a_0 – радиус пузырька;

ρ_0 – давление в окружающей среде (воде);

ρ_1^0 – плотность газа в пузырьке;

n – эффективный показатель политропы газа в пузырьке.

Эти колебания совместно с кавитацией на границе пузырька, возникающей из-за резкого падения давления в струйке воды при выходе ее из форсунки, приводят к резкому росту и взрывному разрушению пузырька, что вызывает механическое дробление струйки или отдельных капель жидкости. Подача углекислого газа вместе с водой должна привести также к изменению коэффициентов проскальзывания и числа Вебера.

Для расчетной оценки дробления капель с использованием углекислого газа необходима разработка достаточно сложной трехфазной модели, поэтому в рамках настоящей работы принято решение провести только экспериментальные исследования.

Дробление двухфазной смеси высокочастотными колебаниями механического диспергатора, использующего эффект Кармана. Рассматривается турбулизатор со срывом потока, возбуждение высокочастотных колебаний в котором происходит за счет последовательных срывов потока, например, за цилиндрическим телом (струной). Пример такого течения показан на рис. 3.

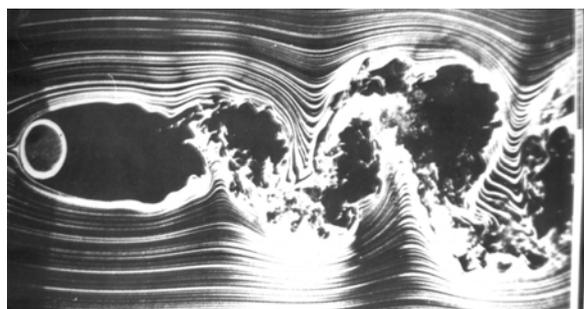


Рис. 3. Картина возможных срывных колебаний в потоке за цилиндрическим телом

Частота генерируемых колебаний рассчитывается по формуле

$$f = 0,212 (1 - 21,2/Re) W/d,$$

где W – скорость потока;

d – характерный размер плохо обтекаемого тела (для цилиндра – диаметр);

$Re = Wd/\nu$ – число Рейнольдса;

ν – коэффициент кинематической вязкости среды.

Проведен расчет частоты колебаний струны в зависимости от ее диаметра и скорости потока. Расчеты показывают, что при таком способе возбуждения частота колебания струн приемлемых диаметров может достигать 100 кГц при скорости двухфазного потока около 100 м/с. На рис. 5 показана зависимость размера капли от генерируемой частоты колебаний. Видно, что достаточно малые капли образуются при частоте 100 кГц.

Недостатками такого диспергатора являются низкая надежность струн, если их диаметр невелик, а также некоторый отбор энергии от двухфазного потока на дробление капель.



Рис. 4. Двухфазное сопло со струнным диспергатором

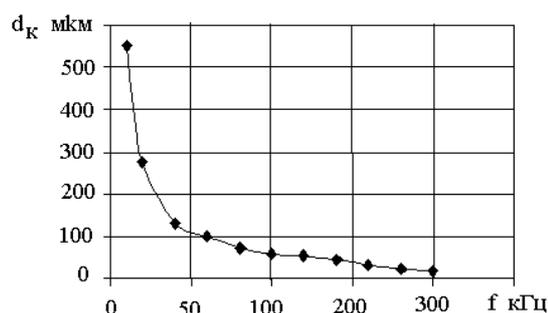


Рис. 5. Зависимость размера капли от генерируемой частоты колебаний

Экспериментальные исследования дисперсности жидкости двухфазного потока

Для проведения исследований влиянию эффекта Кармана на срезе разгонного сопла эксперимен-

тальной установки был установлен специально созданный, съемный струнный диспергатор (рис. 4) [4]. Диспергатор устанавливается на срезе сопла и представляет собой две соединенные стойками профилированные пластины, расположенные под углом друг к другу, несколько превышающим угол раскрытия потока при выходе его из двухфазного разгонного устройства. На краях плоскостей выполнены сверления с шагом 10 мм, через которые пропущена проволока из легированной стали. Натяжение струн обеспечивается подпружиненной рейкой на одной из пластин. В экспериментах использовались струны из нихрома диаметром от 0,8 до 0,3 мм, однако при высоких скоростных напорах и больших расходах воды такая конструкция показала низкую надежность в связи с обрывом струн менее 0,3 мм.

Для исследования влияния паровой фазы на изменение дисперсности капель перед входом в камеру смешения двухфазного разгонного устройства установлена пальцевая форсунка с четырьмя отверстиями диаметром 2 мм. Вода подается в высокотемпературный высокоскоростной поток газа за турбиной ГТД – в переходной патрубке установки. Для исследования влияния направления впрыска воды на испарение форсунка выполнена поворотной. Подача воды в форсунку производилась от общего подводного коллектора. При этом количество испаряемой воды составляет порядка 6% от ее количества, подаваемого в приемную камеру разгонного устройства. В конструкции предусмотрено отключение паровой форсунки.

Для исследования влияния углекислого газа на эффективность дробления жидкой фазы в разгонном устройстве установка оборудована баллоном с углекислотой под первоначальным давлением 11,7 МПа. Углекислый газ подавался через дроссельный кран и редуктор в коллектор подвода воды в камеру смешения. Однако в ходе экспериментов выяснилось, что редуктор при расширении углекислоты обмерзает и не обеспечивает равномерной подачи углекислоты. Давления воды в подводимом коллекторе, газового потока двигателя и углекислого газа на входе в приемную камеру контролировались специальными манометрами, температура газа за турбиной и частота вращения ротора ГТД – приборами на пульте управления двигателем. Расход жидкости, поступающей в камеру смешения разгонного устройства, составил 2л/с, расход газообразной несущей фазы – 1кг/с при избыточном давлении 0,3 кг/см². Расход углекислоты 1 г/кг воды в секунду.

С помощью измерительной установки (см. рис. 5), использующей газовый лазер ЛГН-208Б, приемник излучения ОД-4 с блоком управления и цифровой вольтметр В7-28, были проведены измерения размера капель жидкой фазы сорбентного

потока при различных способах его диспергирования [4]. Проведено сравнение полученных результатов с размерами капель потока, который не подвергался дополнительному диспергированию. Результаты измерений сведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, объемная концентрация мелких капель V_M составляет доли процента от концентрации V_B капель с размерами порядка - 400 мкм, однако суммарная поверхность мелких капель сравнима с поверхностью крупных капель. Поэтому их необходимо учитывать при расчете процессов, связанных с поверхностными эффектами капель биосорбента, обеспечивающими их наибольший контакт с нефтяной пленкой в процессе биоремедиации.

Таблица 1
Результаты измерений

Способы диспергирования	Скорость		
	$V_M 10^5$	$V_M 10^3$	V_M/V_B %
Разгонное сопло без дополнительных диспергирующих устройств	1,3	6,2	0,21
Сопло с насадкой струнного диспергатора	1,48	4,1	0,36
Сопло с подключением паровой фазы	2,00	4,5	0,44
Сопло с впрыском углекислоты	2,10	3,6	0,58
Сопло с насадкой струнного диспергатора и впрыском углекислоты	5,06	14,9	0,34

Анализ результатов проведенных исследований

Проведенные исследования показали:

– при применении струнного диспергатора, генерирующего в потоке высокочастотные колебания, диаметр капель уменьшился в среднем на 11%;

– использование паровой форсунки для предварительного испарения части воды до входа в смешительную камеру разгонного устройства снижает диаметр капель на 17%;

– впрыск углекислоты в коллектор подвода воды уменьшает диаметр капель воды на 26%;

– совместное использование струнного диспергатора и впрыска углекислоты не дало ожидаемого суммарного эффекта; диаметр капель воды при таком способе дробления уменьшился всего на 7%.

– проведенные эксперименты показали, что дробление жидкой фазы при дополнительном дис-

пергировании происходит не только в закрытой части разгонного сопла, но и продолжается за его срезом.

Выводы

Таким образом, применение методов дополнительного диспергирования позволяет получать диаметры капель жидкой фазы порядка 45...70 мкм, что близко к предельным размерам, которые возможно получить механическим дроблением [4].

Литература

1. Епифанов С.В. Многофазный генератор на базе газотурбинного двигателя для решения задачи очистки водной поверхности от нефтепродуктов / С.В. Епифанов, О.М. Бугаенко и др. // *Сучасні проблеми охорони довкілля, раціонального використання водних ресурсів та очистки природних і стічних вод: Міжн. НПК (23-27.04.2007)*. – К.: 2007. – С. 49-52.

2. Бугаенко О.М. Многофункциональный газогенератор для ликвидации последствий загрязнений водных акваторий и грунта нефтепродуктами / О.М. Бугаенко, Ю.А. Гусев, Н.В. Нечипорук // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 8(55). – С. 176-185.

3. Беспятов М.А. Эффективность разгона жидкости конденсирующим паром в присутствии инертной добавки / М.А. Беспятов, А.В. Лященко, С.Д. Фролов // *Вопросы газодинамики энергоустановок: Тем. сб. тр.* – 1976. – Вып. 3. – С. 93-96.

4. Гусев Ю.А. Экспериментальные исследования диспергирующих свойств реактивной струи ГТД / Ю.А. Гусев, О.А. Невичанний, С.В. Епифанов, В.С. Чигрин // *Авиационно-космическая техника и технология: Сб. науч. тр.* – Х.: Гос. Аэрокосмический ун-т «ХАИ», 1998. – Вып.5 (тематический). – С. 496-501.

Поступила в редакцию 2.09.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры В.Е. Веды, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

МЕХАНІЗМИ ДОДАТКОВОГО ДИСПЕРГІВАННЯ РІДКОЇ ФАЗИ БІОСОРБЕНТУ В РОЗГІННОМУ ПРИСТРОЇ БАГАТОФАЗОВОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА

О.М. Бугаєнко, М.В. Нечипорук, Ю.О. Гусев, В.С. Чигрин

Розглянуто питання дослідження методів і пристроїв додаткового диспергівання двофазового потоку біосорбенту газогенератора, що забезпечує створення прогресивної технології збору нафти й нафтопродуктів з поверхні води й ґрунту при їхніх аварійних розливах. Запропоновано схему газодинамічного дроблення й розгону рідини. Представлено експериментальні дослідження дисперсності рідини двофазового потоку з використанням додаткової парової фази, вуглекислого газу й струнного диспергатора. Наведено аналіз результатів експериментальних досліджень.

Ключові слова: двофазовий потік, біосорбент, газогенератор, розгінний пристрій, газодинамічне дроблення, струнний диспергатор.

ADDITIONAL DISPERSING MECHANISMS OF LIQUID PHASE OF BIOSORBENT IN ACCELERATION DEVICE OF MULTI PHASE GAS GENERATOR

O.M. Bugaenko, N.V. Nechiporuk, Y.A. Gusev, V.S. Chigrin

Questions of research of methods and devices for additional dispersing of two phase stream of biosorbent of gas generator, which provides creation of progressive technology for collection of oil and oil products from water surface and ground in case of its emergency overflow, are examined. Scheme for gas-dynamic splitting up and acceleration of fluid is suggested. Experimental researches of dispersion of liquid in two phase stream using additional steam phase, carbonic acid gas and chord dispersing device are shown. Analyses of experimental researches results are shown.

Key words: two phase stream, biosorbent, gas generator, acceleration device, gas dynamic splitting up, chord dispersing device.

Бугаенко Олег Михайлович – директор студгородка ХАИ, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», e-mail: o.bugaenko@mail.ru.

Гусев Юрий Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. 203, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», e-mail: aedlad@ic.kharkov.ua.

Нечипорук Николай Васильевич – канд. техн. наук, доцент, проректор по НПП, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ».

Чигрин Валентин Семенович – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. 203, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», e-mail: aedlad@ic.kharkov.ua.