

УДК 532.501.32

Матюшкин М.В.

Ин- технической теплофизики НАН Украины

РАЗРАБОТКА НА ОСНОВАНИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ МОДЕЛИ МАСШТАБНОГО ПЕРЕХОДА ДЛЯ ПУЛЬСАЦИОННОГО ДИСПЕРГАТОРА И АПРОБАЦИЯ СМОДЕЛИРОВАННОГО ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ*

Описані експериментальні дослідження впливу діаметра труби пульсаційного диспергатора та кута конусної частини труби на швидкість приготування глиняного розчину. На підставі результатів проведених досліджень представлено модель масштабного переходу від лабораторної установки до промислового зразка пульсаційного диспергатора. Представлені результати апробації змодельованого зразка у виробничих умовах.

Описаны экспериментальные исследования влияния диаметра трубы пульсационного диспергатора и угла конусной части трубы на скорость приготовления глинистого раствора. На основании результатов проведенных исследований представлена модель масштабного перехода от лабораторной установки к промышленному образцу пульсационного диспергатора. Представлены результаты апробации смоделированного образца в промышленных условиях.

Experimental investigations of pulse dispergator tube diameter and cone part angle influence on velocity of clay solution preparation are described. Scale transition model from pulse dispergator laboratory device to industrial sample based on carried out research results is presented. Results of modeled sample testing in industrial conditions are presented.

D – диаметр основания конуса в верхней части трубы пульсатора ПД, м;
 $D_{\text{рк}}$ – диаметр рабочей камеры пульсатора ПД, м;
 $D_{\text{тр}}$ – диаметр трубы пульсатора ПД, м;
 $D_{\text{рко}}$ – диаметр рабочей камеры пульсатора промышленного образца ПД, м;
 $D_{\text{тро}}$ – диаметр трубы пульсатора промышленного образца ПД, м;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 $H_{\text{тр}}$ – длина трубы пульсатора ПД, м;
 $H_{\text{тро}}$ – длина трубы пульсатора промышленного образца ПД, м;
 K – число гидродинамической кавитации;
 L – ширина обечайки рабочей камеры пульсатора ПД, м;
 L_0 – ширина обечайки рабочей камеры пульсатора промышленного образца ПД, м;
 $P_{\text{сж.г.}}$ – давление в пульсаторе ПД при подключении к источнику сжатого газа, Па;
 $P_{\text{вак}}$ – давление в пульсаторе ПД при подключении к источнику вакуума, Па;

P_{max} – средняя амплитуда давления при гидроударе в рабочей камере ПД, Па;
 $P_{\text{нас}}$ – давление насыщенных паров, Па;
 $T_{\text{сж.г.}}$ – время подключения пульсатора ПД к источнику сжатого газа, с;
 $T_{\text{вак}}$ – время подключения пульсатора ПД к источнику вакуума, с;
 $V_{\text{рк}}$ – объем рабочей камеры пульсатора ПД, м³;
 $V_{\text{см}}$ – объем емкости смешения ПД, м³;
 $V_{\text{рко}}$ – объем рабочей камеры пульсатора промышленного образца ПД, м³;
 $V_{\text{смо}}$ – объем емкости смешения промышленного образца ПД, м³;
 ДИВЭ – дискретно-импульсный ввод энергии;
 ПД – пульсационный диспергатор;
 α – угол конуса верхней части трубы пульсатора ПД, °;
 ρ – плотность воды, кг/м³;
 τ – среднее время приготовления раствора в ПД, мин.

Введение

В Институте технической теплофизики в рамках изучения особенностей реализации ДИВЭ в гетерогенные системы в ПД были проведены экспериментальные исследования на лабораторном аппарате, конечной целью которых являлась выдача рекомендаций к разработке модели масштабного перехода от лабораторной установки к промышленному образцу.

Необходимость создания подобной модели была продиктована наличием проблемы быстрого и экономичного получения различного рода экстрактов, эмульсий, суспензий в различных областях народного хозяйства и, в частности, приготовления растворов на глинистой основе в нефтегазодобывающей, геологоразведочной и строительной промышленности.

Экспериментальные исследования

Исследуемый аппарат (рис. 1) состоит из резервуара 1, источника сжатого газа 2, источника вакуума 3 и пульсатора 4, разделенного двумя гибкими мембранами 5 на три емкости, крайние из которых посредством трубопровода 6 и клапанов 7, 8 соединены с источником сжатого газа 2 и источником вакуума 3, а средняя емкость оборудована трубой 9, нижняя часть которой опущена в резервуар 1.

Работает аппарат следующим образом. Клапан 7, 8 открываются поочередно. Если клапан 7 закрыт, то клапан 8 – открыт, и крайние емкости пульсатора 4 соединяются с источником вакуума 3, под действием которого гибкие мембраны 5 «расходятся», создавая в средней емкости пульсатора 4 разрежение, в результате чего смесь из резервуара 1 по трубе 9 втягивается в среднюю емкость пульсатора 4. Затем клапан 8 закрывается, а клапан 7 открывается и соединяет крайние емкости пульсатора 4 с источником сжатого газа 2, под действием которого в крайних емкостях пульсатора 4 создается избыточное по сравнению со средней емкостью пульсатора 4 давление, и гибкие мембраны 5 «сходятся» и с силой выталкивают смесь по трубе 9 из средней емкости пульсатора 4 в резервуар 1. Далее цикл многократно повторяется.

Как было показано в работах [1, 2], основными механизмами интенсификации тепломассообмена в ПД являются взрывное вскипание жидкости в смеси жидкость-твердое тело с последующим захлопыванием образовавшихся кавитационных пузырьков под действием гидроудара. Так как требования к форме рабочей камеры ПД, отношению объемов крайних емкостей пульсатора к его средней емкости были определены ранее [3, 4], целью настоящих исследований стало выявление зависимости интенсивности массо-обмена в системе глина-вода (времени приготoвления глинистого раствора) от диаметра трубы пульсатора.

Эксперименты проводились на лабораторном образце ПД с геометрическими параметрами:

$$V_{\text{рк}}=1 \text{ л}; D_{\text{рк}}=0,135 \text{ м}; L=0,05 \text{ м};$$

$$V_{\text{см}}=32 \text{ л}; H_{\text{тр}}=0,6 \text{ м}.$$

В экспериментах использовались трубы с внутренними диаметрами 15, 20, 25, 30 мм. Для визуализации наблюдаемого эффекта кавитации трубы пульсатора были выполнены прозрачными. В верхней части пульсатора устанавливался датчик давлений типа ВТ-206, сигнал от которого фиксировался на осциллографе С8-17.

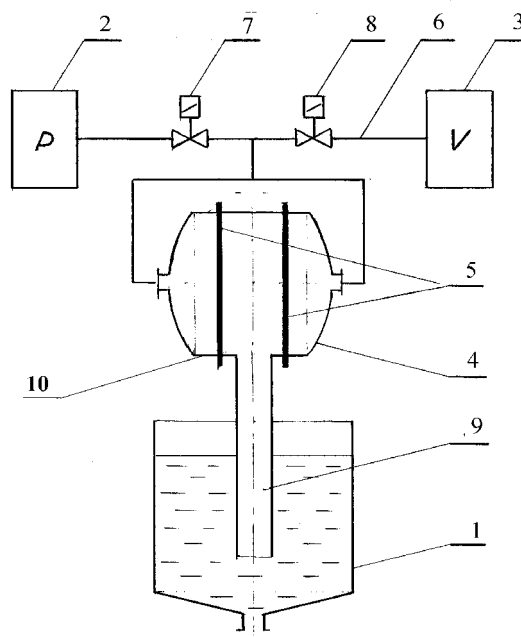


Рис. 1. Принципиальная схема пульсационного диспергатора.

О степени интенсивности массообмена в ПД судили по определяемым реологическим характеристикам глинистого раствора и водоотдаче. После отбора пробы обработку раствора прекращали в случае удовлетворения указанных параметров регламентным нормам для бурового раствора. Для этой цели использовались приборы СНС-2 (определение статического напряжения сдвига), ВП-5 (определение условной вязкости), ВМ-6 (определение водоотдачи). В экспериментах использовался глинопоршок ПБМ-16 дашуковского бентокомбината.

Во всех экспериментах ПД работал в одном и том же режиме, параметры которого составляли: $P_{сж.г.} = 3$ ата; $P_{вак} = 0,3-0,4$ ата; $T_{сж.г.} = 0,2-0,4$ с; $T_{вак} = 0,7-1$ с.

Результаты исследований представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, быстрее всего раствор готовился при использовании трубы с диаметром 20 мм. Здесь наблюдался наибольший по величине гидроудар. Визуально в прозрачной трубе пульсатора при экспериментах с водой наблюдалось образование облака кавитационных пузырьков (фото на рис. 2) при выталкивании воды из камеры пульсатора.

Характерные зависимости амплитуды давления в камере пульсатора изображены на рис. 3. Так как, собственно, фактор сочетания числа кавитации и величины гидроудара определяет интенсивность массообмена в ПД, было предположено, что именно в трубе диаметром 20 мм упомянутое сочетание оптимально. Для снижения гидравлических потерь на сопротивление потоку смеси из камеры пульсатора в трубу было решено выполнить вход в трубу коническим. Как было указано в [5], наиболее оптимальными для данного случая являются конусы с углами раствора, лежащими в пределах 40-60°. В связи с этим для металлической трубы диаметром 20 мм и длиной 60 мм были изготовлены металлические конусы с диаметром основания 40 мм и углами раствора 40°, 50° и 60°, при помощи которых труба соединялась с обечайкой камеры пульсатора (10 на рис. 1). Здесь диаметр основания конуса из соображений максимального снижения гидравлического сопротивления выбирался максимально приближенным к ширине обечайки. Эксперименты по приготовлению глинистых растворов на такой конструкции

Табл. 1. Зависимости величины гидроудара и времени приготовления глинистого раствора от диаметра трубы пульсатора.

$D_{тр.}$, мм	15	20	25	30
P_{max} , ата	5,7	6,0	5,8	5,5
τ , мин	19,3	18	19,2	22

Табл. 2. Зависимости величины гидроудара, числа кавитации и времени приготовления глинистого раствора от угла конусной части трубы пульсатора.

α , °	40	50	60
P_{max} , ата	5,9	6,0	6,0
K	31,6	32,7	34
τ , мин	16,25	16,3	16,2

ПД проводились по той же методике, что и предыдущие. Результаты экспериментов представлены в табл. 2.

Здесь число кавитации определялось по [6] следующим образом:

$$K = (D/D_{тр})^4 [0,64 + 0,112(\cos(\alpha/2))^3 + 0,106(\cos(\alpha/2))^4] - 1 + 1/8(\sin(\alpha/2)). \quad (1)$$

Как видно из сравнения данных табл. 1 и 2, коническое соединение трубы пульсатора с его камерой дало уменьшение времени приготовления раствора с 18 до 16,2-16,3 минут, при этом величина гидроудара в среднем не изменилась.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов было определено, что в лабораторном образце ПД с емкостью рабочей камеры 1 л, шириной обечайки камеры 5 см оптимально использовать трубу пульсатора диаметром 20 мм, верхняя часть которой выполнена конической с углом конуса 40-60°. Диаметр присоединения конуса к обечайке должен по величине максимально приближаться к ширине обечайки.

Проведенные эксперименты завершили серию исследований [1, 2] особенностей ДИВЭ в лабораторном образце ПД и позволили перейти непосредственно к разработке модели масштабного перехода к опытно-промышленному образцу.

Моделирование

В ИТТФ НАН Украины была разработана математическая модель ПД, описывавшая течение жидкости в емкости устройства уравнением Лагранжа-Коши, в которое были добавлены члены, учитывающие потери энергии.

В процессе исследований математическая модель была скорректирована с учетом экспериментальных данных [7]. После корректировки математическая модель позволяет с достаточной степенью достоверности описать гидродинамическую обстановку в ПД.

Физическое моделирование базируется на теории подобия, которая устанавливает условия подобия модели и оригинала и дает возможность обобщить найденные зависимости на подобные системы. Ввиду того, что при таком способе моделирования невозможно соблюсти равенство всех критериев и параметров подобия, в качестве основных выбираются те, которые наиболее влияют на интенсификацию массообмена. Как показали исследования, в данном случае таким критерием стало число кавитации K . В качестве параметров подобия были выбраны величина гидроудара P_{\max} , удельный расход энергии $A_{\Sigma y}$ и величина удельных энергозатрат E_y .

Непосредственно моделирование проходило следующим образом.

Соблюдая геометрическое подобие модели и опытного образца, было решено для последнего сохранить отношение объемов камеры пульсатора и емкости смешения. Учитывая, что моделирование проходило с целью создания опытного образца с разовой загрузкой в 2 м^3 , что и составило объем емкости смешения, объем рабочей камеры пульсатора определился из соотношения:

$$V_{\text{рко}} = V_{\text{смо}} \cdot V_{\text{рк}} / V_{\text{см}} = 0,0625 \text{ м}^3.$$

Для рабочей камеры пульсатора геометрическое подобие было соблюдено для $D_{\text{рк}} / L = 2,7$; для $L / D_{\text{тр}} = 2,5$ и для равенства междиафрагменного объема к сумме двух задиафрагменных, тогда

$$V_{\text{рко}} = 2 \cdot (\pi D_{\text{рко}}^2 / 4) \cdot L_0, \text{ откуда } D_{\text{рко}} = 0,54 \text{ м,}$$

$$\text{а } L_0 = 0,2 \text{ м, откуда } D_{\text{тро}} = 0,08 \text{ м.}$$

Длина трубы пульсатора промышленного образца ПД как последний искомый геометрический параметр подбиралась в ходе нижеописанных

расчетов до оптимального выполнения условий равенства параметров физического подобия.

Очевидно, что в промышленном образце при обеспечении тех же величин давления в рабочей камере пульсатора ПД и сохранении геометрического подобия размеров рабочей камеры пульсатора скорости потока в трубе промышленного образца будут равны скоростям в лабораторном, был произведен расчет энергетических характеристик существующей модели и проектируемого опытного образца по нижеследующим зависимостям:

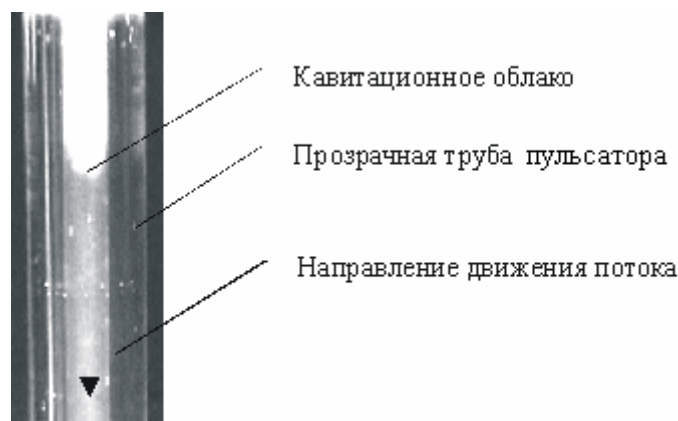


Рис. 2. Момент образования кавитационного облака на выходе из рабочей камеры в прозрачную трубу пульсационного диспергатора при «схождении» мембран.

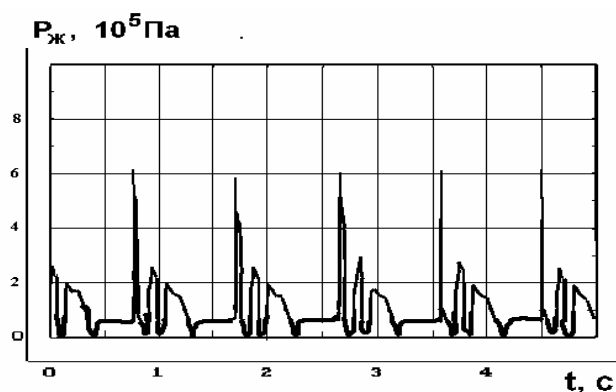


Рис. 3. Экспериментальная зависимость амплитуды давления от времени в жидкостном тракте. Датчик установлен в верхней части обечайки рабочей камеры диспергатора.

K – число кавитации – рассчитывалось по формуле (1);

$A_{вт} = V_{рк} \rho g H + \xi \rho \frac{g^2}{2} h \omega_{тр}$ – работа, затрачиваемая на втягивание смеси в рабочую камеру пульсатора, где $V_{рк} \rho g H$ – работа, идущая на подъем смеси ($H = H_{тр} + D_{рк} / 2$ – высота подъема суспензии от нижнего среза трубы пульсатора до центра масс суспензии в рабочей камере пульсатора); $\xi \rho \frac{v_{см}^2}{2} h \omega_{тр}$ – работа, идущая на преодоление местных сопротивлений при сужении сечения (переход жидкости из емкости смешения в трубу пульсатора) и при расширении сечения (переход жидкости из трубы в камеру пульсатора), где $\xi = 0,5 (1 - (D_{тр} / D_{ем})^2 + 1 - (D_{тр} / L)^2)$ – суммарный коэффициент сопротивлений [5];

$h = V_{рк} / \omega_{тр}$ – длина пути при движении суспензии из емкости смешения в рабочую камеру

пульсатора; $\omega_{тр} = \frac{\pi D_{тр}^2}{4}$ – площадь поперечного сечения трубы пульсатора;

$A_{сопр} = (\Delta P_{вт} + \Delta P_{выт}) \cdot h \cdot \omega_{тр}$ – работа, затрачиваемая на преодоление местных сопротивлений, где $\Delta P_{вт} + \Delta P_{выт} = H_{тр} \cdot \rho \cdot (\lambda_{вт} v_{вт}^2 + \lambda_{выт} v_{выт}^2) / (2 \cdot D_{тр})$ – потери давления при преодолении местных сопротивлений при втягивании и выталкивании суспензии из рабочей камеры пульсатора по формуле Дарси-Вейсбаха, где $\lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}}$, коэффициенты сопротивлений по формуле Никурадзе;

$A_{выт} = V_{рк} \rho g H + \xi \rho \frac{v_{выт}^2}{2} h \omega_{тр}$ – работа, затрачиваемая на выталкивание суспензии из рабочей камеры пульсатора, где $V_{рк} \rho g H$ – работа, идущая на опускание суспензии по трубе пульсатора от центра масс в рабочей камере пульсатора до нижнего среза трубы пульсатора, $\xi \rho \frac{v_{выт}^2}{2} h \omega_{тр}$ – потеря энергии на преодоление местных сопротив-

Табл. 3. Сравнительный расчет энергетических параметров для лабораторной установки и промышленного образца ПД

Для лабораторной установки				Для промышленного образца			
К	34			К	34		
P , ата	2	3	4	P , ата	2	3	4
$v_{вт}$, м/с	6,7	6,7	6,7	$v_{вт}$, м/с	5,8	5,8	5,8
$v_{выт}$, м/с	7,8	10,2	12,7	$v_{выт}$, м/с	8,1	12	14,2
$A_{вт}$, Дж	36,7	36,7	36,7	$A_{вт}$, Дж	2574	2574	2574
$\Delta P_{вт}$, ата	0,115	0,115	0,115	$\Delta P_{вт}$, ата	0,047	0,047	0,047
$\Delta P_{выт}$, ата	0,146	0,24	0,358	$\Delta P_{выт}$, ата	0,087	0,18	0,24
$A_{сопр}$, Дж	26,1	35,5	47,3	$A_{сопр}$, Дж	838	1419	1794
$A_{выт}$, Дж	42,5	68	101,7	$A_{выт}$, Дж	3628	6521	7441
A_{Σ} , Дж	79,2	104,7	138,4	A_{Σ} , Дж	6202	9095	10015
$A_{\Sigmaу}$, Дж/м ³	2475	3272	4325	$A_{\Sigmaу}$, Дж/м ³	3101	4547,5	5007,5
$A_{пу}$, Дж/м ³	3290	4381	5803	$A_{пу}$, Дж/м ³	3520	5257	5905
τ , мин	20	18	16	τ , мин	20	18	16
N , мин ⁻¹	60	40	30	N , мин ⁻¹	60	40	30
E_y , кВт·ч/м ³	1,1	0,88	0,77	E_y , кВт·ч/м ³	1,17	1,05	0,79

лений при сужении сечения (переход жидкости из камеры пульсатора в трубу) и при расширении (переход жидкости из трубы в емкость смешения), где $\xi = 0,5 (1 - (D_{тр}/L)^2 + 1 - (D_{тр}/D_{ем})^2)$.

$A_{\Sigma} = A_{вт} + A_{выт}$ – энергия, идущая на создание единичного импульса;

$A_{\Sigma y} = A_{\Sigma} / V_{см}$ – удельная энергия, идущая на создание единичного импульса;

$A_{пу} = (A_{\Sigma} + A_{сопр}) / V_{см}$ – полная энергия, затрачиваемая на единичную пульсацию, отнесенная к единице объема продукции;

$E_y = A_{пу} \cdot N \cdot \tau_{пр}$ – удельные энергозатраты аппарата, где N – количество пульсаций в минуту, τ – время приготовления единичной загрузки в минутах;

Результаты расчетов для $H_{тро} = 1,7$ м сведены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, для выбранных геометрических размеров опытного образца расчетная энергия, идущая на создание единичного импульса, $A_{\Sigma y}$ на 15-30 % выше расчетной $A_{\Sigma y}$ для лабораторной установки, при этом удельные энергозатраты E_y для опытного образца и для лабораторной установки практически одинаковы. Эти факторы в совокупности с обеспечением условий кавитационного диспергирования дают основания предположить успешный переход от лабораторной модели к опытно-промышленному образцу.

Выводы

В результате моделирования в ИТТФ НАН Украины была разработана техническая документация на опытно-промышленный образец ПД. Стационарная установка емкостью 2 м³ была изготовлена на опытном производстве ИТТФ НАН

Украины и прошла производственные испытания в г. Днепропетровске на базе Специализированного строительного-монтажного управления Национального Аэрокосмического Центра Украины. Описание установки представлено в [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Мартиненко І.І., Корчинський О.А., Матюшкін М.В. Нова технологія приготування промивальних рідин для буріння свердловин // Мінеральні ресурси України.- 1998.- № 4.- С. 36-38.
2. Мартиненко І.І., Корчинський О.А., Матюшкін М.В., Корняга Ф.В., Непомнящий А.С. Приготування бурових розчинів за методом імпульсного введення дискретних порцій енергії // Нафтова та газова промисловість.- 1999.- № 5.- С. 30-32.
3. Долінський А.А., Корчинський О.А., Гартвіг А.П., Матюшкін М.В. Патент на винахід № 43175 А «Масообмінний пристрій» В 01 Д 11/14, В 01 F 3/08 від 20.03.2001.
4. Долінський А.А., Корчинський О.А., Гартвіг А.П., Матюшкін М.В. Патент на винахід № 58295 А «Масообмінний пристрій» В 01 Д 11/04, В 01 F 3/08 від 05.07.2003.
5. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям.- М: Госэнергоиздат, 1960.- 464 с.
6. Арзуманов Э.С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях.- М: Энергия, 1978.- 42 с.
7. Иваницкий Г.К., Корчинский А.А., Матюшкин М.В. Математическое моделирование процессов в пульсационном диспергаторе ударного типа// Приложение к журналу «Пром. теплотехника».- 2003.- № 1.- С. 29-34.

Получено 12.10.2004 г.