



УДК 665.6/7:621.928.3

A.A.KHUDAIBERDIEV, A.M.HURMAMATOV, O.YU.ISMAILOV

## THE DISTRIBUTION OF IMPURITIES ALONG THE HEIGHT OF THE CONICAL PART OF THE HYDROCYCLONE IN THE PURIFICATION OF HYDROCARBONS

Гидроциклон воситасида углеводородли хом-ашёларни механик қўшимчалардан тозалаш жараёнини ўрганиш натижалари келтирилган. «Муаллақ» заррачалар эквивалент диаметрини тажрибавий гидроциклоннинг ( $D = 0,4$  м,  $h_k = 0,65$  м) конуссимон қисми баландлиги бўйича тақсимоми графиги қурилган. Олинган натижалар таҳлили углеводородли хом-ашёларни марказдан қочма куч майдонида, ажратилаётган фазаларнинг физик хоссаларидан келиб чиқиб,  $0,024 \div 0,2$  мм ўлчамли заррачалардан тозалаш имконияти мавжудлигини кўрсатди. Заррачаларнинг эквивалент диаметрини тақсимлашни қонунияти  $d_c = f(h_k)$  гидроциклоннинг конуссимон қисми шаклини танлаш учун тавсия сифатида ишлатилиши мумкин.

**Калим сўзлар:** нефть, газ конденсати, пиролиз дистилляти, турли жинсли система, суспензия, механик қўшимчалар, «муаллақ» заррача, ажратиши, марказдан қочма куч, гидроциклон, қовушқоқлик, зичлик.

Приведены результаты исследования процесса очистки углеводородного сырья от механических примесей при помощи гидроциклона. Построены кривые распределения эквивалентного диаметра «равновесных» частиц по высоте конической части опытного образца гидроциклона ( $D = 0,4$  м,  $h_k = 0,65$  м). Анализ полученных данных показал возможности центробежной очистки углеводородного сырья от частиц с размером от  $0,024$  до  $0,2$  мм, в зависимости от физических свойств разделяемых фаз. Закономерность распределения эквивалентного диаметра частиц  $d_c = f(h_k)$  может быть использована в качестве рекомендации для выбора формул конической части гидроциклонов.

**Ключевые слова:** нефть, газовый конденсат, пиролизный дистиллят, суспензия, механические примеси, «равновесная» частица, разделение, гидроциклон.

The results of the study of the process of purification of hydrocarbons from mechanical impurities using hydrocyclone are presented. The distribution curves of the equivalent diameter of the "equilibrium" particles along the height of the conical part of the test sample of the hydrocyclone are constructed ( $D = 0.4$  m,  $h_k = 0.65$  m). The analysis of the obtained data showed the possibility of centrifugal purification of hydrocarbon raw materials from particles with a size of  $0.024$  to  $0.2$  mm, depending on the physical properties of the phases to be separated. The distribution pattern of the equivalent diameter of the particles of  $HF = a(RC)$  can be used as a recommendation for the selection of the formulas of the conical part of hydrocyclones.

**Key words:** oil, gas condensate, pyrolysis distillate, suspension, mechanical impurities, "equilibrium" particle, separation, hydrocyclone.

Гидроциклоны широко применяются для проведения процессов разделения неоднородных систем «жидкость - твердое тело» в поле центробежных сил. Они могут быть использованы для предварительной очистки жидкого углеводородного сырья от механических примесей (песка, частицы глины и выбуренной породы) в объектах их добычи и подготовки к транспортировке.

В нефтеперерабатывающих предприятиях вторичная очистка углеводородного сырья от примесей не производится. Механические частицы частично осаждаются при хранении сырья в резервуарах, в зависимости от продолжительности технологического цикла производства. По этой причине, из-за малой длительности отстаивания, концентрация мелких примесей в составе перерабатываемого сырья довольно высока.

В силу этого, на стадии тепловой подготовки углеводородного сырья к перегонке происходит забивания нагаром труб теплообменных аппаратов [1,2]. Постепенно растущий слой нагара на стенках труб уменьшает их сечения, как в поперечном, так и в продольном направлениях

[3]. Это обстоятельство ухудшает условия равномерного питания трубок жидкостью и повышает гидравлическое сопротивление аппаратов. Кроме этого, коэффициенты теплопроводности нагара внутри труб и ржавчины на внешней их поверхности от воздействия греющего теплоносителя имеют малые численные значения -  $1,16 \div 3,49$  Вт/(м·К) [4]. В результате этого снижается коэффициент теплопередачи в теплообменниках [5], их тепловая мощность падает и увеличивается продолжительность простоя аппаратов на очистку и ремонт.

Введение узла очистки сырья от механических примесей в состав технологической линии его тепловой подготовки способствует устранению вышеописанных негативных явлений и сокращению эксплуатационных затрат. При этом использование гидроциклонов для эффективной очистки углеводородного сырья от механических примесей является малоизученной задачей, имеющей важную научно-практическую ценность.

Существующие типовые конструкции гидроциклонов в основном состоят из полого корпуса с цилиндрическими и коническими частями, патрубка для тангенциальной подачи суспензии, верхнего патрубка для отвода осветленной жидкости и патрубка для разгрузки выделенных твердых частиц с нижней части аппарата [6-8]. Основным недостатком этих устройств является трудность организации рациональных гидродинамических условий разделения, что снижает их технологическую эффективность при работе с вязкими суспензиями ( $40 \div 83,5$  %) [9].

Для повышения эффективности разделения суспензий предложены конструкции гидроциклонов, конические части которых выполнены с криволинейной поверхностью, в виде гиперболы [10], тангенсоиды [11], а также с вогнутыми и выпуклыми участками [12]. Взаимосвязь между конструктивными параметрами этих аппаратов (диаметр, высота конической части, длины вогнутых и выпуклых участков, радиуса патрубков и пр.), обеспечивающих реализацию их функционального назначения, описаны математическими выражениями. Однако, в состав последних не входят переменные технологического процесса (например, производительность, размер улавливаемых частиц и пр.) и показатели физических свойств разделяемых фаз (вязкость, плотность). Это обстоятельство ограничивает эффективное применение предложенных устройств в процессах очистки нефтяного сырья.

Эффективность процесса очистки жидкого углеводородного сырья от механических примесей в гидроциклонах определяется возможностью улавливания трудно осаждаемых мелких, так называемых, «граничных» (или «равновесных») твердых частиц, которые свободно перемещаются в потоке жидкости. Частицы, размером меньше «равновесного», беспрепятственно переходят в сливной патрубок для очищенной жидкости. Эквивалентный диаметр и концентрация таких «равновесных» частиц в составе очищенной жидкости определяют эффективную работу гидроциклона. Последняя выражается в соответствии со степенью чистоты очищенной жидкости к регламентированным требованиям: например, минимальный диаметр механических примесей в составе перерабатываемой нефти  $50 \div 100$  мкм, а их массовое содержание - не более  $0,03 \div 0,05$  % [13,14].

С целью анализа эффективности очистки жидкого углеводородного сырья в гидроциклоне нами изучено распределение эквивалентного диаметра твердых частиц в составе очищенной жидкости по высоте конической части аппарата.

Согласно теории процесса разделения суспензий в центробежном поле, в горизонтальной плоскости гидроциклона на твердую частицу действуют две силы - центробежная  $F_{ц}$  и сила сопротивления потока сырья  $G_c$ , движущегося к оси гидроциклона с переменной радиальной скоростью  $v_r$ . Взаимодействие этих двух сил приводит к сепарации потока сырья на твердые механические частицы и осветленную жидкость.

Величину центробежной силы  $F_{ц}$  в любом рассматриваемом локальном объеме потока суспензии можно определить по выражению [9]:

$$F_{ц} = (m_{ч} - m_{ж}) v_o^2 / r, \quad (1)$$

где  $m_{\text{ч}}$  и  $m_{\text{ж}}$  - соответственно, масса частицы и жидкости, кг;  $v_0$  - окружная скорость вращения потока, которая возрастает по мере приближения потока к оси гидроциклона, м/с;  $r$  - радиус вращения частицы в рассматриваемой точке аппарата, равный текущему его радиусу, м.

В связи с наличием двух разделяемых потоков (потоки жидкости и твердых частиц) можно предположить о существовании таких твердых частиц в объеме потока очищаемого сырья, которые способствуют равенству сил  $F_{\text{ц}} = G_{\text{с}}$ . Для такой частицы, называемой «равновесной», в соответствии с законом Стокса [9]

$$(m_{\text{ч}} - m_{\text{ж}}) v_0^2 / r = 3\pi\mu v_{\text{г}} d_{\text{ч}}, \quad (2)$$

где  $\mu$  - динамический коэффициент вязкости жидкости, Па·с;  $d_{\text{ч}}$  - эквивалентный диаметр твердой частицы, м.

Из (2), после проведения ряда математических преобразований, получено выражение для определения диаметра «равновесной» частицы  $d_{\text{ч}}$  [9]:

$$d_{\text{ч}} = (3/v_0) \cdot [Q_{\text{ж}} \mu / \pi h_{\text{к}} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})]^{0,5}, \quad (3)$$

где  $Q_{\text{ж}} = (\pi d_{\text{п}}^2 / 4) v_0$  - объемная производительность гидроциклона, м<sup>3</sup>/с;  $v_0 = 4Q_{\text{ж}} / (\pi d_{\text{п}}^2) = 4G_{\text{ж}} / (\pi d_{\text{п}}^2 \rho_{\text{ж}})$  - начальная окружная скорость потока жидкости, м/с;  $G_{\text{ж}}$  - массовый расход жидкости, кг/с;  $d_{\text{п}}$  - диаметр патрубка для подачи жидкости, м;  $h_{\text{к}}$  - высота конической части гидроциклона, м;  $\rho_{\text{ч}}$  и  $\rho_{\text{ж}}$  - соответственно, плотность твердой частицы и жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Подставляя выражения производительности гидроциклона  $Q_{\text{ж}}$  и окружной скорости подачи жидкости в аппарат  $v_0$  в (3) получено уравнение для расчета диаметра «равновесной» частицы [9]:

$$d_{\text{ч}} = (3/4) d_{\text{п}}^2 \cdot [\pi \mu \rho_{\text{ж}} / G_{\text{ж}} h_{\text{к}} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})]^{0,5}. \quad (4)$$

Технологическую эффективность работы гидроциклона, определяемой размерами «равновесных» частиц в составе очищенной жидкости, можно показать расчетным путем, анализируя степень очистки углеводородного сырья от твердых частиц в аппарате. Одним из методов такого анализа является изучение характера распределения «равновесных» частиц с эквивалентным диаметром  $d_{\text{ч}}$  по высоте конической части гидроциклона  $h_{\text{к}}$ , вычисляемым по (4).

Расчет процесса очистки углеводородного сырья от механических примесей в поле центробежных сил выполнен применительно к опытному образцу гидроциклона, который имеет следующие конструктивные параметры (мм): диаметр цилиндрической части  $D_{\text{ц}} = 400$ , высота цилиндрической части  $H_{\text{ц}} = 400$ , высота конической части  $h_{\text{к}} = 650$ , диаметры патрубков для подачи сырья  $d_{\text{п}} = 150$ , отвода очищенной жидкости  $d_{\text{сл}} = 140$  и спуска выделенных механических примесей  $d_{\text{р}} = 50$ . Производительность гидроциклона по исходному сырью составляет  $G_{\text{ж}} = 1,725$  кг/с.

При расчетах использованы опытные данные по ситовому анализу состава механических примесей, выделенных из партии углеводородного сырья, перерабатываемого Бухарским НПЗ [15]. Среднее значение плотности твердых частиц составляет  $\rho_{\text{ч}} = 1700$  кг/м<sup>3</sup>.

Эффективность процесса очистки углеводородного сырья в опытном образце гидроциклона определяли путем расчета эквивалентного диаметра «равновесных» частиц  $d_{\text{ч}}$  по (4). Основные показатели физических свойств углеводородного сырья - нефти, газового конденсата, нефтегазоконденсатной смеси (30 % нефти и 70 % газового конденсата) и пиролизного дистиллята, отхода Устюртского ГХК, при 20 °С приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные показатели физических свойств углеводородного сырья

№	Углеводородное сырье	Плотность $\rho_{\text{ж}}$ , кг/м <sup>3</sup>	Вязкость $\mu_{\text{ж}}$ , 10 <sup>3</sup> Па·с
1	Газовый конденсат	759	0,781
2	Нефть	853	5,39
3	Смесь нефти (30 %) и газового конденсата (70 %)	788	1,12
4	Пиролизный дистиллят	842	0,78

Результаты проведенных расчетов изображены на рис. 1, в виде кривых распределения эквивалентного диаметра  $d_q$  «равновесных» твердых частиц по высоте конической части  $h_k$  опытного образца гидроциклона, т.е.  $d_q = f(h_k)$ .

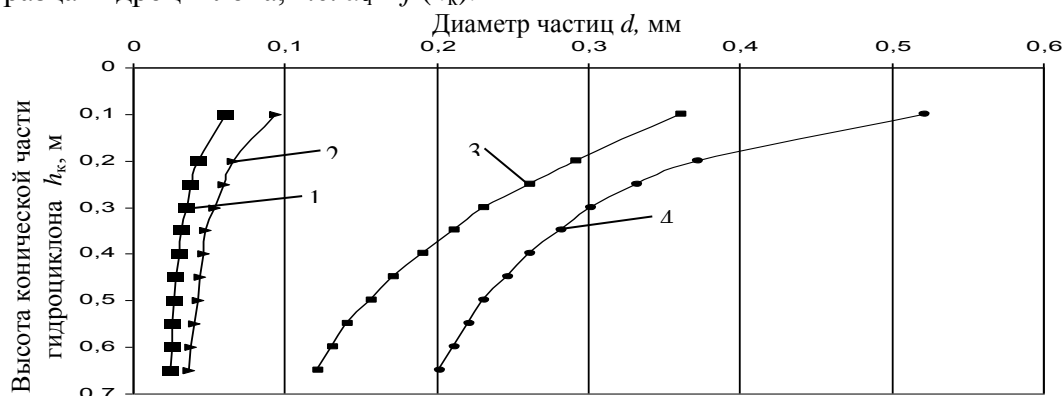


Рис. 1. Кривые распределения эквивалентного диаметра «равновесных» частиц  $d_q$  в потоке углеводородного сырья по высоте конической части  $h_k$  гидроциклона.

1 - газовый конденсат; 2 - нефтегазоконденсатная смесь (30% Н+70%ГК); 3 - пиролизный дистиллят; 4 - нефть.

Как видно из кривых 1-4 рисунка, характер распределения «равновесных» частиц по высоте конической части  $h_k$  гидроциклона изменяется по нелинейному закону. На начальных участках гидроциклона, например, при  $h_k = 0,1$  м и  $D_{вн} = 0,4$  м, центробежная сила имеет минимальную величину. По этой причине, расчетные диаметры «равновесных» частиц имеют относительно большие значения и колеблются в пределах  $0,06 \div 0,52$  мм: для газового конденсата -  $0,06$  мм, нефти -  $0,52$  мм, для нефтегазоконденсатной смеси -  $0,1$  мм и пиролизного дистиллята -  $0,36$  мм.

В дальнейшем, с увеличением вниз высоты конической части гидроциклона до  $h_k = 0,65$  м при  $D_{вн} \rightarrow d_p = 50$  мм, величина центробежной силы постепенно растет. В силу этого, значение диаметра «равновесных» частиц в потоке уменьшается до предельных значений  $0,024 \div 0,2$  мм: для газового конденсата -  $0,024$  мм, нефти -  $0,2$  мм, смеси нефти с газовым конденсатом -  $0,036$  мм и пиролизного дистиллята -  $0,12$  мм. Частицы с размером меньше, чем диаметры «равновесных» частиц, могут уходить потоком очищенного сырья в верхний сливной патрубок гидроциклона.

Относительное расположение кривых 1-4 на рисунке указывает на влиянии вязкости и плотности углеводородного сырья на размеры «равновесных» частиц. Как известно, повышение вязкости среды приводит к росту радиального сопротивления и снижению окружной скорости движения потока, что является причиной уменьшения величины центробежной силы. В силу этого, увеличивается диаметр «равновесных» частиц в составе очищенной жидкости и падает технологическая эффективность работы гидроциклона.

Повышение плотности сырья приводит к уменьшению разности плотностей разделяемых фаз и оказывает влияние на величину движущей силы процесса. В данном случае, величина относительной плотности  $[\rho_{ж}/(\rho_{ч}-\rho_{ж})]$  в (4) приводит к уменьшению эквивалентного диаметра «равновесных» частиц в газоконденсате на 10 %, нефтегазоконденсатной смеси на 7 % и пиролизного дистиллята на 11%, а размер частиц в составе нефти увеличивается на 0,3 %.

Данное обстоятельство указывает на целесообразность учета физических свойств разделяемых фаз при установлении рациональных пределов разбавления вязких суспензий и регулирования степени их очистки в гидроциклонах.

Кроме этого, полученная закономерность распределения эквивалентного диаметра частиц  $d_q = f(h_k)$  должна быть учтена в качестве рекомендации для выбора формул конической части гидроциклонов для разделения неоднородных систем «жидкость - твердое тело». С учетом этого,

нами разработана конструкция гидроциклона с конической частью, выполненной в форме вогнутой криволинейной поверхности, описываемой уравнением (4) [16].

Таким образом, анализ распределения эквивалентного диаметра «равновесных» частиц по высоте конической части опытного гидроциклона ( $D = 0,4$  м и  $h_k = 0,65$  м) показал возможности очистки углеводородного сырья от механических частиц диаметром от 0,024 до 0,2 мм. При этом, технологическая эффективность работы гидроциклона, определяемая размером улавливаемых частиц, зависит от физических свойств разделяемых фаз и рациональных пределов разбавления вязких суспензий. Полученные кривые распределения  $d_{ch} = f(h_k)$  могут быть использованы в качестве рекомендации для выбора формул конической части гидроциклонов. Такая конструкция гидроциклона с конической частью, выполненная с вогнутой криволинейной поверхностью, обеспечивает улучшенные гидродинамические условия для разделения фаз суспензий и повышения эффективности процесса очистки нефтяного сырья от механических примесей в поле центробежных сил.

#### References:

1. Ismailov O.YU. Ustanovka dlya izucheniya obrazovaniya otlojeniy na vnutrenney poverhnosti trub teploobmenny'h apparatov // Uzbekskiy himicheskij jurnal. - Tashkent. - 2016. - № 6. - S. 49-55.
2. Ismailov O.YU., Rahmonov T.Z. Izuchenie usloviya obrazovaniya otlojeniy v trubah teploobmenny'h apparatah // Nauchno-tehnicheskij jurnal: Himicheskaya promyshlennost'. - Sankt-Peterburg, 2017. - № 2 - S. 74-78.
3. Hudayberdiev A.A., Artikov A.A., Salomov H.T. Raspreделение nagara v predvaritel'ny'h distillyatorah ND-1250 // Jurnal: Maslo-jirovaya promyshlennost'. - M.: Legkaya i pisch'evaya promyshlennost', 1983. - № 11. - S. 11-13.
4. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. Primery i zadachi po kursu processov i apparatov himicheskoy tehnologii. Uchebnoe posobie dlya vuzov / Pod red. P.G. Romankova. - 10-e izd., pererab. i dop.- L.: Himiya, 1987. - 576 s. - S. 96-97, 529.
5. Ismailov O.YU., Hudoyberdiev A.A., Hurmamatov A.M. Issledovanie zavisimosti koefficienta teploperedachi ot tolsch'iny' nakipi i rejima dvizheniya nagrevaemoy neftegazokondensatnoy smesi v gorizont'al'noy trube // Nauchno-tehnicheskij jurnal: Neftepererabotka i neftehimiya. - M., 2017. - № 2. - S. 42-45.
6. kasatkin A.G. Osnovny'e processy' i apparaty' himicheskoy tehnologii: Uchebnik dlya vuzov. - 8-e izd., pererab. - M.: Himiya, 1971. - 784 s. - S. 99-104, 223-224, 237-238.
7. Skoblo A.I., Molokanov YU.K., Vladimirov A.I. i dr. Processy' i apparaty' neftegazopererabotki i neftehimii: Uchebnik dlya vuzov. 3-e izd., pererab. i dop. - M.: Nedra, 2000. - 677 s. - S.397-402, 415-420.
8. Ponikarov I.I., Perely'gin O.A., Doronin V.N., Gaynullin M.G. Mashiny' i apparaty' himicheskikh prozvodstv: Uchebnik dlya vuzov. - M.: Mashinostroenie, 1989. - 368 s. - S. 222-225.
9. Hudayberdiev A.A. Sovershenstvovanie processa predvaritel'noy distillyacii miscel'ly' rastitel'nogo masla. - Diss... kand. tehn. nauk. - Tashkent: TashPI, 1988. - 197 s. - S. 134-142.
10. A.s. SU 673316. Gidrociklon dlya klassifikacii produktov izmel'cheniya / Grinman I.G., Denisov V.H. - Opubl. 15.07.1979. Byul. № 26.
11. A.s. SU 1357082 A1. Gidrociklon /SCH'erbakov E'.L., Bry'zgalov V.N. - Opubl. 07.12.1987. Byul. № 45.
12. A.s. SU 1567282 A1. Gidrociklon /Jityanny'y V.YU., Naydenko V.V., Petrov V.V., Le'mushkin S.YU. - Opubl. 30.05.1990. Byul. № 20.
13. Ahmetov S.A. Tehnologiya glubokoy pererabotki nefti i gaza. Uchebnoe posobie dlya vuzov / S.A. Ahmetov. - SPb.: Nedra, 2013. - 544 s. - S. 88.
14. Glagoleva O.F., Kapustin V.M., Gyul'misaryan T.G. i dr. Tehnologiya pererabotki nefti. V 2-h chastyah. CHast' pervaya. Pervichnaya pererabotka nefti / Pod red. O.F. Glagolevoy i V.M. Kapustina. - M.: Himiya, KolosS, 2006. - 400 s. - S. 191-192.
15. Hurmamatov A.M. Rezul'taty' granulometricheskogo analiza chastic mehanicheskikh primesey uglevodorodnogo sy'r'ya // Uzbekskiy himicheskij jurnal: - Tashkent, 2015. - № 1. - S. 44-48.
16. Hurmamatov A.M. Vy'sokoe`ffektivny'y gidrociklon dlya ochistki uglevodorodnogo sy'r'ya ot melkodispersny'h chastic // Uzbekskiy jurnal nefti i gaza: - Tashkent, 2017. - № 4. - S. 48-50.

*Худайбердиев Абсалом Абдурасулович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института общей и неорганической химии АН РУз. Тел.: +998977218842(м.). E-mail: [jarayon@rambler.ru](mailto:jarayon@rambler.ru); [jarayon@mail.ru](mailto:jarayon@mail.ru);*

*Хурмаматов Абдузаффар Мирзабдуллаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией «Процессы и аппараты химической технологии» Института общей и неорганической химии АН РУз.*

*Тел.: +998911926469(м.). E-mail: [gofuri1980@mail.ru](mailto:gofuri1980@mail.ru);*

*Исмаилов Ойбек Юлибаевич – младший научный сотрудник Института общей и неорганической химии АН РУз.*

*Тел.: +998909694784 (м.). E-mail: [ismoilovnmipi@mail.ru](mailto:ismoilovnmipi@mail.ru).*