

УДК 628.334.51

**В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, О. С. Дмитриева,
В. В. Харьков, А. Р. Галимова**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕЭМУЛЬСАЦИИ ВОДОНЕФТЯНОЙ ЭМУЛЬСИИ В ОТСТОЙНИКЕ С ГОФРИРОВАННЫМИ ПЛАСТИНАМИ

Ключевые слова: водонефтяная эмульсия, отстойник, гофрированная пластина, деэмульсация.

Важной задачей для нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий является повышение эффективности деэмульсации водонефтяной эмульсии. Предлагается использовать сепарационные элементы в виде гофрированных пластин с ориентацией гофр под углом 45°, расположенных в отстойнике параллельно друг другу. Целью работы является изучение влияния применения гофрированных пластин на изменение эффективности разделения водонефтяной эмульсии. В качестве определяющих параметров выбраны скорость движения эмульсии, которая формирует размер вихрей и задает их силу, а также диаметр нефтяных глобул. Моделирование процесса разделения водонефтяной эмульсии было выполнено в ANSYS Fluent. В ходе исследований были рассмотрены три модели устройства, отличающиеся геометрическими размерами – каждая последующая модель была больше предыдущей на 50%. Проведенные численные исследования процессов деэмульсации водонефтяной эмульсии в разработанном отстойнике показали, что интенсификация данных процессов осуществляется за счет возникновения множества точек вихреобразования по длине пластин, способствующих усилению процесса расслоения эмульсии. В ходе исследований установлено, что наибольшая эффективность процесса деэмульсации равная в среднем 81,7% достигается при скорости движения водонефтяной эмульсии 0,11 м/с и диаметре нефтяных глобул 5–50 мкм. Увеличение трехмерной модели отстойника со всеми его составляющими показало, что значимых изменений эффективности при исследовании процессов деэмульсации не фиксировалось. Эффективность процесса в среднем составляла 80,9% при скорости движения эмульсии 0,09–0,12 м/с. Таким образом, применение гофрированных пластин в отстойниках имеет практическую значимость для предприятий нефтяной отрасли при механическом методе деэмульсации водонефтяной эмульсии.

**V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, O. S. Dmitrieva,
V. V. Kharkov, A. R. Galimova**

STUDY OF WATER-OIL EMULSION DEMULSIFICATION IN SEDIMENTATION TANK WITH CORRUGATED PLATES

Keywords: water-oil emulsion, wash tank, corrugated plate, demulsification.

Efficiency enhancement of water-oil emulsion demulsification is an essential task for oil refineries and petrochemical plants. It is proposed to use corrugated plates with the orientation of corrugations at an angle of 45° located in the sedimentation tank parallel to each other as separation elements. The aim of the work is to study the effect of the use of corrugated plates on the change in the separation efficiency of water-oil emulsion. The velocity of emulsion motion, which forms the size of the vortices and sets their strength, as well as the diameter of the oil globules, were chosen as the key parameters. Simulations of the water-oil emulsion separation process were performed using ANSYS Fluent. During the research, three models of the device were considered, differing in geometric dimensions; each subsequent model was 50% larger than the previous one. Performed numerical studies of water-oil emulsion demulsification processes in the developed tank have shown that intensification of these processes is carried out due to numerous points of vortex formation along the length of plates, which contribute to the breaking of emulsion. The results of the studies showed that the highest efficiency of the demulsification process is averaged 81.7% at the water-oil emulsion motion velocity of 0.11 m/s and at the oil globule diameter of 5-50 μm. An increase in the three-dimensional model of the tank with all its components showed that no significant changes in efficiency were recorded in the study of demulsification processes. The process efficiency is averaged 80.9% at the emulsion motion velocity of 0.09-0.12 m/s. Thus, the use of corrugated plates in sedimentation tanks is of practical importance for oil industry enterprises with a mechanical method of demulsification of an water-oil emulsion.

В настоящее время наиболее распространенным способом добычи нефти является закачка воды под давлением в нефтяной пласт, что позволяет ее оттуда вытеснять. В результате обводненность нефти увеличивается до 90%. Интенсивное перемешивание пластовой воды и нефти ведет к образованию устойчивых водонефтяных эмульсий, которые усложняют процесс ее дальнейший транспортировки и переработки [1, 2]. При переработке нефти с высоким содержанием воды повышается давление в аппаратах, производительность их падает, что требует первичной подготовки нефти по обезвоживанию. Поэтому актуальной задачей для нефтеперерабатывающих и

нефтехимических предприятий является повышение эффективности деэмульсации водонефтяной эмульсии. При проведении обезвоживания водонефтяной эмульсии важной ее технологической характеристикой является дисперсность, которая показывает степень раздробленности дисперсной фазы в среде. Размер капель нефти в эмульсиях имеют различные значения: мелкодисперсные (0,2–20 мкм), среднедисперсные (20–50 мкм), грубодисперсные (50–300 мкм) [2–4]. В нефтяной промышленности существуют различные методы деэмульсации водонефтяной эмульсии: механические, термохимические и электрохимические. Механический метод является наиболее

простым и представляет собой гравитационное отстаивание эмульсии. Термохимический метод заключается в вводе деэмульгаторов в исходную эмульсию, под действием которых разрушается сольватная оболочка глобулы воды и происходит осаждение коалесцированных капель воды в нефти. Электрохимический метод основан на пропускании нефти через электрическое поле, в результате чего капли воды поляризуются и деформируются с разрушением защитных пленок и последующим их столкновением и укрупнением.

В настоящее время наиболее распространенным и эффективным методом деэмульсации водонефтяной эмульсии является механический. К его основным преимуществам относятся простота конструкции устройств и низкие материальные затраты для его реализации. Данный процесс осуществляется в объемном резервуаре, в котором осаждается более плотная жидкость (вода) и поднимается менее плотная – нефть. Недостатками данного метода являются низкая скорость отстаивания нефти и малоэффективная деэмульсация мелкодисперсных водонефтяных эмульсий [5–7]. Поэтому разработка технических решений для повышения эффективности разделения водонефтяных эмульсий в отстойниках и увеличения их пропускной способности является актуальной задачей.

Авторами работы были предложены сепарационные элементы в виде гофрированных пластин с ориентацией гофр под углом 45° , которые размещаются в отстойнике параллельно друг другу (рис. 1) [8–9].

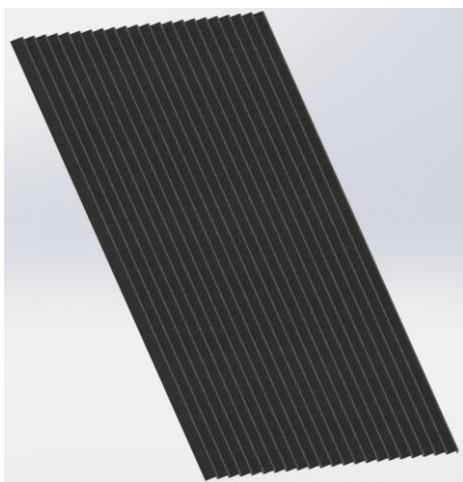


Рис. 1 – 3D модель гофрированной пластины

Процесс деэмульсации водонефтяной эмульсии в отстойнике можно описать следующим образом: на входном патрубке в отстойник задавался массовый расход и диаметр глобул нефти, который варьировался $a = 5\text{--}200$ мкм. Исходная водонефтяная эмульсия двигалась параллельно двум гофрированным пластинам, которые вследствие своей геометрии позволяли создать волновую структуру движения потока, что в свою очередь является причиной интенсификации разделения водонефтяной эмульсии. Далее частицы нефти поднимались в верхнюю часть отстойника, вследствие разности плотностей с водой. Остальная жидкость стремилась в нижнюю часть

отстойника. Вывод легкой фазы осуществлялся через верхний выходной патрубок, а тяжелой фазы – через нижний выходной патрубок.

Очевидно, что скорость движения водонефтяной эмульсии и размер нефтяных глобул, диспергированных в ней, являются одними из первостепенных факторов, влияющих на эффективность ее деэмульсации. Это обусловлено механизмом деэмульсации водонефтяной эмульсии, происходящим в рассматриваемом отстойнике с сепарационными элементами и влиянием данных параметров на этот процесс. При движении водонефтяной эмульсии между двумя гофрированными пластинами возникает волновая структура потока с множеством точек вихреобразований, которые располагаются параллельно пластинам по всей их длине.

С одной стороны, вихреобразования способствуют процессу расслоения нефтяных глобул от воды, что повышает эффективность деэмульсации водонефтяной эмульсии. С другой стороны, происходит дополнительное перемешивание потока, что понижает эффективность деэмульсации. В зависимости от скорости движения водонефтяной эмульсии изменяются сила и размер вихрей, которые являются причинами превалирования процесса расслоения над перемешиванием или наоборот [10]. Нефтяные глобулы, находящиеся под действием точек вихреобразования в зависимости от своих размеров и плотностей, также способствуют одному из процессов – деэмульсации или эмульсации. В данном исследовании плотность нефтяных глобул принималась постоянной, поэтому ее влияние на два данных процесса не учитывалось.

Целью данной работы является исследование влияния применения гофрированных пластин на изменение эффективности разделения водонефтяной эмульсии. Важной задачей является определение интервалов значений определенных параметров, при которых происходит превалирование процесса расслоения над смешением. Основными параметрами, влияющими на интенсификацию деэмульсации водонефтяной эмульсии в данном исследовании, являются скорость ее движения, которая формирует размер вихрей и задает их силу, также диаметр нефтяных глобул, которые вследствие своего размера усиливают один из процессов – расслоения или смешения.

Была построена трехмерная модель отстойника, внутри которого размещались исследуемые гофрированные пластины со следующими геометрическими размерами: высота и ширина области ввода воды – 100 и 5 мм, соответственно, высота и ширина гофрированных пластин – 100 и 300 мм, соответственно, диаметр гофр – 8 мм, расстояние между 2 гофрированными пластинами – 10 мм, высота межсекционной перегородки – 50 мм.

В ходе численного моделирования в ANSYS Fluent принимались следующие постоянные значения: температура окружающей среды 20°C , количество частиц нефти, вводимых в отстойник $n = 1000$, плотность воды $998,2 \text{ кг/м}^3$ и плотность нефти 920 кг/м^3 . Для получения более обширных данных в ходе чис-

ленных исследований трехмерная модель устройства увеличивалась в 1,5 и 2 раза.

Эффективность разделения водонефтяной эмульсии в отстойнике определялась по следующему выражению $E = 1 - n/1000$, где n – количество глобул нефти на выходном нижнем патрубке отстойника, предназначенном для вывода тяжелой фазы.

Результаты проведенных исследований представлены в графическом виде на рис. 2–4. Эффективность деэмульсации водонефтяной эмульсии в отстойнике с использованием гофрированных сепарационных элементов изменялась в диапазоне от 64,6 до 84,7 % в зависимости от ее скорости движения и размера нефтяных глобул. При скорости движения водонефтяной эмульсии равной 0,02 и 0,11 м/с эффективность ее деэмульсации составляла в среднем 66,2 и 80,4 %, соответственно, при диаметре нефтяных глобул от 5 до 200 мкм.

Рассмотрение двух интервалов изменения их размеров (5–50 мкм и 100–200 мкм) при различных скоростях движения эмульсии показывает, что увеличение размера нефтяных глобул не всегда приводит к повышению эффективности (рис. 2). Например, при скорости движения эмульсии 0,02 м/с эффективность деэмульсации составляла в среднем 66,1 % для каждого из рассмотренных выше диапазонов изменения диаметра нефтяных глобул. При скорости движения эмульсии равной 0,11 м/с эффективность деэмульсации уменьшалась в среднем с 81,5 до 79,1 % при рассмотрении двух данных диапазонов изменения размера нефтяных глобул.

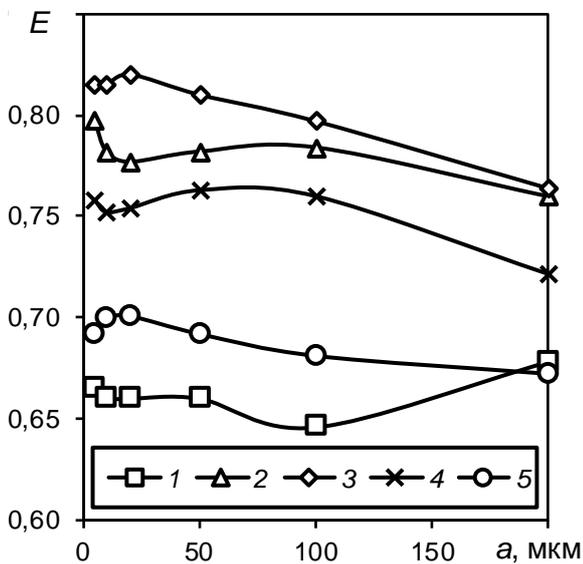


Рис. 2 – Эффективность деэмульсации водонефтяной эмульсии в отстойнике с гофрированными пластинами от диаметра нефтяных глобул в зависимости от ее скорости движения W , м/с: 1 – 0,02; 2 – 0,06; 3 – 0,11; 4 – 0,17; 5 – 0,22

Таким образом, при скорости движения водонефтяной эмульсии 0,11 м/с и размере нефтяных глобул 5–50 мкм достигается максимальная эффективность ее деэмульсации, равная в среднем 81,7 %, так как процесс расслоения наиболее выражен относительно смещения (рис. 2). Увеличение размера

устройства и всех его составляющих в 1,5 и 2 раза показало, что наибольшая эффективность деэмульсации водонефтяной эмульсии равная в среднем 80,9 % соответствует диапазону скоростей 0,09–0,12 м/с (рис. 3–4).

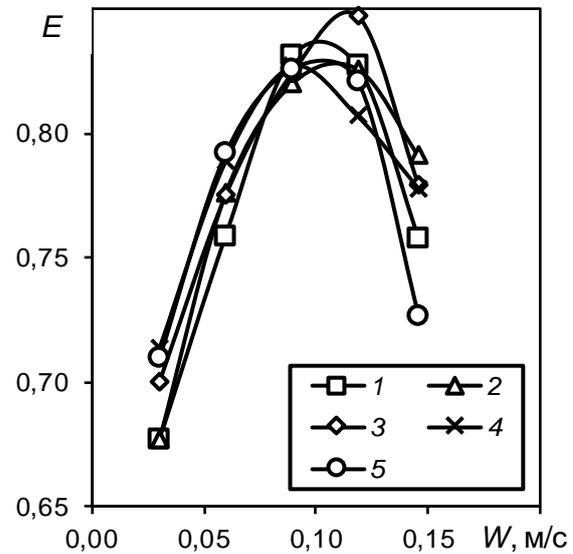


Рис. 3 – Эффективность деэмульсации водонефтяной эмульсии в отстойнике с гофрированными пластинами от ее скорости движения в зависимости от диаметра нефтяных глобул a , мкм: 1 – 5; 2 – 20; 3 – 50; 4 – 100; 5 – 200. Результаты получены при увеличении модели отстойника в 1,5 раза

Эффективность деэмульсации водонефтяной эмульсии при диаметре диспергированных в ней глобул нефти от 5 до 200 мкм в среднем составила 66,2, 78,1, 80,4, 75,1 и 68,9 % при ее скорости движения 0,02, 0,06, 0,11, 0,17 и 0,22 м/с, соответственно. Увеличение диаметра нефтяных глобул от 5 до 200 мкм приводило к изменению эффективности деэмульсации водонефтяной эмульсии в большую или меньшую сторону не более, чем на 3 %. Следует отметить, что для диапазона изменения диаметра нефтяных глобул равного 5–50 мкм изменение эффективности деэмульсации составляло не более 1–2 %. Для диапазона 50–200 мкм изменение эффективности составляло не более 2–3 % (рис. 2).

При увеличении устройства и всех его составляющих элементов в 1,5 раза эффективность деэмульсации водонефтяной эмульсии при скорости ее движения в диапазоне от 0,03 до 0,15 м/с составила в среднем 69,2, 77,6, 82,1, 82,7 и 76,7 % при диаметре нефтяных глобул 5, 20, 50, 100 и 200 мкм, соответственно. Максимальная эффективность деэмульсации составила 84,7 % при скорости движения водонефтяной эмульсии равной 0,12 м/с и диаметре нефтяных глобул равных 50 мкм. Минимальная эффективность деэмульсации была зафиксирована при скорости движения водонефтяной эмульсии 0,03 м/с и диаметре нефтяных глобул 10 мкм, которая соответствовала значению 67,2 % (рис. 3).

При увеличении устройства и всех его составляющих в 2 раза эффективность деэмульсации водонефтяной эмульсии при скорости ее движения в диапазоне от 0,05 до 0,11 м/с составила в среднем 76,3,

78,5, 82,9, 80,8 и 75,8 % при диаметре нефтяных глобул 5, 20, 50, 100 и 200 мкм, соответственно. Минимальная и максимальная эффективности деэмульсации водонефтяной эмульсии в отстойнике составила 74,4 и 84,3 % соответственно. При этом минимальная эффективность деэмульсации водонефтяной эмульсии была зафиксирована при ее скорости движения 0,05 м/с и диаметре нефтяных глобул 10 мкм, максимальная эффективность деэмульсации была получена при скорости 0,09 м/с и диаметре 100 мкм (рис. 4).

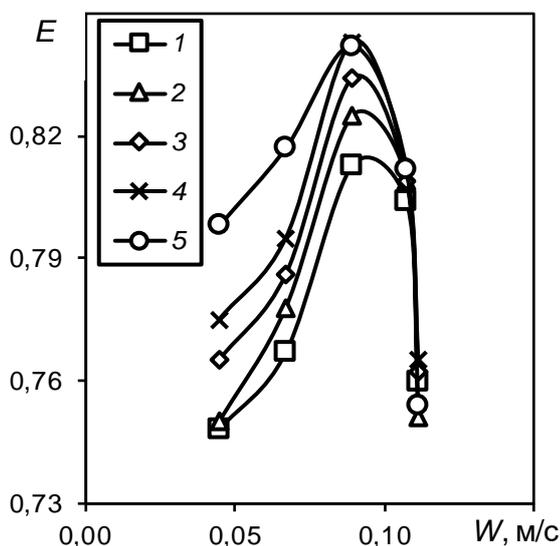


Рис. 4 – Эффективность деэмульсации водонефтяной эмульсии в отстойнике с гофрированными пластинами от ее скорости движения в зависимости от диаметра нефтяных глобул a , мкм: 1 – 5; 2 – 20; 3 – 50; 4 – 100; 5 – 200. Результаты получены при увеличении модели отстойника в 2 раза

Проведенные численные исследования процессов деэмульсации водонефтяной эмульсии в отстойнике с сепарационными элементами, представляющими собой гофрированные пластины с ориентацией под углом 45° , показали, что интенсификация данных процессов осуществляется за счет возникновения множества точек вихреобразований по длине пластин, способствующих усилению процесса расслоения эмульсии. Однако, точки вихреобразований также способны дополнительно перемешивать эмуль-

сию. В ходе исследований установлено, что наибольшая эффективность процесса деэмульсации равная в среднем 81,7 % достигается при скорости движения водонефтяной эмульсии 0,11 м/с и диаметре нефтяных глобул 5–50 мкм. Увеличение трехмерной модели отстойника со всеми его составляющими в 1,5 и 2 раза показало, что значимых изменений при исследовании процессов деэмульсации не фиксировалось. Эффективность процесса в среднем составляла 80,9 % при скорости движения эмульсии 0,09–0,12 м/с. Таким образом, применение гофрированных пластин с ориентацией гофр под углом 45° в отстойниках имеет практическую значимость для предприятий нефтяной отрасли при механическом методе деэмульсации водонефтяной эмульсии.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-616.2020.8.

Литература

1. Z. Grenoble, S. Trabelsi, *Adv. Colloid and Interface Sci.*, 260, 32–45 (2018).
2. R. Zolfagharia, A. Fakhru'l-Razi, L. C. Abdullah, S. S.E.H. Elnashaie, A. Pendashteh, *Sep Purif Technol*, 170, 377–407 (2016).
3. Д.Н. Левченко, Н.В. Бергштейн, А.Д. Худякова, Н.М. Николаева, *Эмульсии нефти с водой и методы их разрушения*. Химия, Москва, 1967. 200 с.
4. Г.Н. Позднышев, *Стабилизация и разрушение нефтяных эмульсий*. Недра, Москва, 1982. 224 с.
5. Ф.М. Хуторянский, *Обезвоживание и обессоливание нефти: Химическая энциклопедия*. Т. 3. Научн. изд. Большая российская энциклопедия, Москва, 1992. 608 с.
6. В.М. Виноградов, В.А. Винокуров, *Образование, свойства и методы разрушения нефтяных эмульсий*. ФГУП «Нефть и газ», РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, Москва, 2007. 31 с.
7. J. Sjoblom, *Encyclopedic handbook of emulsion technology*. Marcel Dekker, New York, 2001. 621 p.
8. H. Schubert, H. Armbruste, *Intl. Chemical Engineering*, 32, 1, 14–28 (1992).
9. V.E. Zinurov, I.I. Sharipov, O.S. Dmitrieva, I.N. Madyshev, *E3S Web of Conferences*, 157, 06001 (2020).
10. А.В. Дмитриев В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, С.В. Данг, *Вестник Казанского государственного энергетического университета*, 3(39), 65–71 (2018).
11. А.А. Овчинников, В.В. Харьков, *Вестник Казанского технологического университета*, 17, 23, 322–325 (2014).

© В. Э. Зинуров – аспирант ФГБОУ ВО «КГЭУ», vadd_93@mail.ru; А. В. Дмитриев – д.т.н., зав. кафедрой «Теоретические основы теплотехники» ФГБОУ ВО «КГЭУ», ieremiada@gmail.com; О. С. Дмитриева – к.т.н., доцент кафедры оборудования пищевых производств (ОПП) ФГБОУ ВО «КНИТУ», ja_deva@mail.ru; В. В. Харьков – старший преподаватель кафедры ОПП ФГБОУ ВО «КНИТУ», v.v.kharkov@gmail.com; А. Р. Галимова – студент ФГБОУ ВО «КГЭУ», galimovaar00@mail.ru.

© V. E. Zinurov – postgraduate student, Kazan State Power Engineering University (KSPEU), vadd_93@mail.ru; A. V. Dmitriev – Doctor of Engineering, Head of Department «Theoretical Basis of Thermotechnics», KSPEU, ieremiada@gmail.com; O. S. Dmitrieva – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Food Production Equipment, Kazan National Research Technological University (KNRTU), ja_deva@mail.ru; V. V. Kharkov – Senior Lecturer, Department of Food Production Equipment, KNRTU, v.v.kharkov@gmail.com; A. R. Galimova – student, KSPEU, galimovaar00@mail.ru.