

УДК 631.3

UDC 631.3

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ  
УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО  
РАЗДЕЛЕНИЯ ВОДОНЕФТЯНОЙ  
ЭМУЛЬСИИ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ  
КОМПЛЕКСЕ**

**DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF A  
DEVICE FOR EFFECTIVE SEPARATION OF  
WATER-OIL EMULSION IN THE AGRO-  
INDUSTRIAL COMPLEX**

Мутугуллина Ирина Александровна  
Канд. техн. Наук, доцент  
SPIN – код автора: 8425-6136  
*Казанский государственный энергетический  
университет, Казань, Россия*

Mutugullina Irina Alexandrovna  
Cand.Tech.Sci., associate Professor  
RSCI SPIN-code: 8425-6136  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan,  
Russia*

Юмадилова Аида Ильдаровна  
Студент  
*Казанский государственный энергетический  
университет, Казань, Россия*

Yumadilova Aida Ildarovna  
Student  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan,  
Russia*

В настоящей работе рассмотрена конструкция вихревого сепарационного устройства, предназначенного для разделения водонефтяных эмульсий, образующихся в агропромышленном комплексе. Особое внимание уделено изучению влияния скорости потока и размера нефтяных глобул на эффективность расслоения легкой и тяжелой фаз. В отличие от традиционных методов очистки, предложенная система оснащена гофрированными пластинами, расположенными под углом 45°, благодаря чему формируются дополнительные зоны вихреобразования. Это способствует ускоренному слипанию и коалесценции нефтяных капель, что в конечном счете ведет к повышению эффективности отделения. Для определения оптимальных гидродинамических условий в аппарате выполнено численное моделирование в программной среде ANSYS Fluent, учитывающее ряд ключевых параметров: диапазон скорости эмульсии (0,02–0,22 м/с), варьирование диаметра капель (5–200 мкм), а также влияние межсекционных перегородок. Анализ полученных данных показал, что наибольшая эффективность (до 82,1%) достигается при скорости около 0,11 м/с, при этом для более крупных глобул характерны несколько меньшие показатели за счет возрастания сил смешения и дезагрегации. Представленные результаты могут найти широкое применение на предприятиях АПК, связанных с обработкой маслосодержащих отходов и сточных вод. Введение гофрированных пластин, ориентированных под заданным углом, обеспечивает оптимальный баланс между

This article examines the design of a vortex separation device intended for the separation of water-oil emulsions formed in the agro-industrial complex. Special attention is paid to studying the influence of flow velocity and oil droplet size on the efficiency of phase separation between the light and heavy fractions. Unlike traditional purification methods, the proposed system is equipped with corrugated plates arranged at a 45° angle, which create additional vortex formation zones. This contributes to the accelerated coalescence and merging of oil droplets, ultimately leading to increased separation efficiency. To determine the optimal hydrodynamic conditions in the apparatus, numerical modeling was carried out using the ANSYS Fluent software, considering several key parameters: the emulsion velocity range (0.02–0.22 m/s), the variation in droplet diameter (5–200 μm), and the effect of inter-sectional baffles. The analysis of the obtained data showed that the highest separation efficiency (up to 82.1%) is achieved at a flow velocity of approximately 0.11 m/s. However, for larger oil droplets, the efficiency is slightly lower due to increased mixing forces and droplet disintegration. The presented results can be widely applied in agro-industrial enterprises dealing with the treatment of oil-containing waste and wastewater. The introduction of corrugated plates oriented at a specified angle ensures an optimal balance between vortex processes and the residence time of droplets in the settling chamber. It has been demonstrated that this approach provides a viable solution for reducing environmental impact while maintaining the technological and economic requirements of agro-industrial production

вихревыми процессами и временной задержкой капель в отстойнике. Показано, что такой подход дает реальную возможность снизить нагрузку на окружающую среду, соблюдая при этом технологические и экономические требования агропромышленного производства

Ключевые слова: ВОДОНЕФТЯНАЯ ЭМУЛЬСИЯ, ВИХРЕВОЙ СЕПАРАТОР, ГОФРИРОВАННЫЕ ПЛАСТИНЫ, АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗДЕЛЕНИЯ

Keywords: WATER-OIL EMULSION, VORTEX SEPARATOR, CORRUGATED PLATES, AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX, NUMERICAL MODELING, SEPARATION EFFICIENCY

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-207-051>

**Введение.** Современный агропромышленный комплекс (АПК) активно использует разнообразное оборудование и технологические процессы, в которых задействуются нефтепродукты – от смазочных материалов для сельскохозяйственной техники до топливных компонентов и масел при переработке растительного сырья. В ходе эксплуатации техники, ремонта и технического обслуживания нередко образуются сточные воды, содержащие эмульсии масла и воды, которые трудно поддаются стандартным методам очистки. Кроме того, на перерабатывающих предприятиях аграрного сектора (масложировая, мясомолочная промышленность и др.) также наблюдается скопление водонефтяных эмульсий. Их несвоевременная утилизация или недостаточная очистка может приводить к загрязнению окружающей среды, негативно сказываясь на плодородии почв и качестве сельскохозяйственной продукции.

С каждым годом в секторе АПК возрастает потребность в высокоэффективных и надежных технологиях фильтрации и сепарации жидкостей, призванных обеспечивать экологическую безопасность и экономическую эффективность хозяйственных процессов. Оптимальная переработка или повторное использование маслосодержащих отходов позволяют уменьшить затраты на покупку новых ресурсов и снизить нагрузку на природные экосистемы. Традиционные методы, такие как

<http://ej.kubagro.ru/2025/03/pdf/51.pdf>

гравитационное отстаивание, часто оказываются недостаточными при обработке эмульсий с мелкодисперсными нефтяными включениями. Появление все более тонкодисперсных систем требует применения специальных устройств и решений, которые повышают интенсивность процесса разделения фаз.

Технологии, основанные на гидродинамических эффектах – вихревых потоках, создании турбулентных зон и установке сепарационных элементов, – дают возможность сокращать время отстаивания и повышать эффективность извлечения нефтяной фракции. Внедрение подобных разработок непосредственно в агропромышленное производство способствует сокращению затрат на очистку воды, снижению аварийных рисков, связанных с утечками нефтепродуктов, а также повышению экологической ответственности предприятий. Использование специализированных аппаратов для разделения водонефтяных эмульсий открывает путь к более рачительному и замкнутому водно-ресурсному циклу, что особенно актуально в регионах с ограниченным водным балансом или повышенными требованиями к качеству воды.

Предлагаемое исследование направлено на изучение новой конструкции вихревого сепарационного устройства, способного работать с широким спектром эмульсий, что особенно важно для предприятий АПК. Изучение гидравлических характеристик такого устройства и выявление оптимальных условий его эксплуатации позволит повысить уровень технологической подготовки аграрных предприятий и дополнительно стимулировать применение ресурсосберегающих технологий.

Одним из ключевых факторов, определяющих эффективность разделения водонефтяной эмульсии, является гидродинамический режим внутри сепарационного устройства. При недостаточной турбулентности потока процесс коалесценции капель нефти замедляется, что снижает эффективность разделения фаз. С другой стороны, чрезмерное увеличение

скорости потока может привести к повторному диспергированию капель нефти, усложняя процесс их отделения. Поэтому особую роль играет выбор оптимальной конструкции сепарационного аппарата, позволяющей сбалансировать вихревые эффекты и обеспечить максимальное извлечение легкой фазы. В этом контексте разработка устройств с направленным воздействием на динамику потока, например, посредством использования гофрированных пластин, представляет собой перспективное направление в области технологий очистки сточных вод, что делает исследуемую тему актуальной для агропромышленного комплекса.

**Состояние исследований и актуальность проблемы.** Вопрос разделения водонефтяных эмульсий длительное время остается в центре внимания научного сообщества, поскольку подобные эмульсии образуются при добыче и переработке нефти, в химической промышленности, а также в сельском хозяйстве и смежных отраслях. Традиционные способы очистки, основанные на отстаивании в резервуарах или применении флотационного оборудования, не всегда обеспечивают требуемую степень сепарации при высоком объеме стоков или мелком размере нефтяных капель. Кроме того, такие методы могут требовать значительных затрат времени и площадей, что не всегда оправдано в современных условиях масштабирования аграрных предприятий [1].

Мировая практика показывает, что внедрение инновационных сепарационных установок, использующих эффекты вихревого воздействия или специфические конструкции сепарационных элементов (например, многоуровневые пластинчатые пакеты или гофрированные поверхности), способно существенно повысить эффективность выделения нефтяной фазы. Ряд исследователей отмечает, что при создании дополнительных зон турбулентности внутри аппарата ускоряется процесс коалесценции капель нефти, а их дальнейшее слияние облегчает разделение жидкости на светлую и тяжелую фазы.

Дополнительный интерес к данной проблеме вызывают экологические требования, которые становятся все жестче, особенно в области сельского хозяйства. Регулирующие органы стремятся снизить негативное влияние нефтепродуктов на почвенные и водные ресурсы, в результате чего предприятиям АПК необходимы надежные и энергоэффективные способы отделения нефтяных включений от воды. При этом возникает необходимость совершенствовать методы численного моделирования процессов разделения эмульсий, поскольку подобный инструмент дает возможность прогнозировать поведение системы под влиянием различных факторов (скорость потока, размер нефтяных глобул, геометрия сепарационного устройства и пр.).

Современные исследования указывают на перспективность использования именно вихревых камер, дополненных набором пластин и перегородок, создающих волнообразное движение жидкости и повышающих вероятность столкновения микрокапель нефти. Тем не менее, не все аспекты такой конфигурации аппаратов раскрыты в полной мере. Для оптимизации конструкции, снижения гидравлического сопротивления и повышения эффективности требуется комплексный анализ, включающий методы вычислительной гидродинамики, экспериментальные испытания и технико-экономическую оценку. Данный подход в полной мере актуален для агропромышленного комплекса, нуждающегося в адаптивных, высокопроизводительных и экологически безопасных системах очистки сточных вод.

**Цель исследований.** Численное моделирование разделения водонефтяной эмульсии.

**Материалы и методы исследований.** В рамках проведенного исследования была разработана и детально проанализирована конструкция отстойника, дополненного сепарационными элементами в виде гофрированных пластин, расположенных под углом  $45^\circ$  к потоку.

Предполагалось, что такая конфигурация создает внутри аппарата зоны с интенсивным вихреобразованием, способствующие взаимодействию капель нефти и ускоряющие процесс коалесценции. Считается, что многочисленные волновые участки гофр повышают вероятность слипания микрокапель и их последующего объединения, тем самым обеспечивая более высокую степень выделения легкой нефтяной фазы из воды.

Для проверки данной гипотезы была создана трехмерная модель сепарационного устройства в программном комплексе ANSYS Fluent, где учитывались основные размеры корпуса (высота, ширина и глубина), параметры входного потока и ключевые физические характеристики воды и нефти. Расстояние между гофрированными пластинами, их высота и поперечный шаг подбирались таким образом, чтобы обеспечить достаточную площадь контакта эмульсии с сепарационными элементами и усилить волновую структуру потока.

При численном эксперименте в входную область аппарата подавалась смесь воды и нефти с различным диаметром глобул (от 5 до 200 мкм), моделируя реальные условия эксплуатации на предприятиях АПК. В расчетах учитывали влияние изменения скорости потока (0,02–0,22 м/с) на формирование зон вихрей, а также оценивали степень расслоения жидкости на легкую и тяжелую фазу. Для поддержания реалистичных условий температура среды принималась равной 20 °С, плотности фаз соответствовали значениям 998,2 кг/м<sup>3</sup> для воды и 920 кг/м<sup>3</sup> для нефти.

**Результаты исследований.** При анализе данных вычислительного эксперимента было установлено, что эффективность разделения водонефтяной эмульсии зависит от двух основных факторов: линейной скорости потока в отстойнике и размера нефтяных глобул. На рис. 1 представлена совокупная зависимость эффективности сепарации от скорости эмульсии в диапазоне 0,02–0,22 м/с при различных диаметрах

капель нефти (5, 20, 50, 100 и 200 мкм). Средние значения достигали порядка 74,5–74,2% при оптимальных параметрах потока, при этом для наиболее крупных частиц (около 200 мкм) эффективность в среднем оказывалась несколько ниже (71,9%).

Максимальное расслоение было отмечено при скорости приблизительно 0,11 м/с: при диаметре нефтяных глобул 20 мкм эффективность достигала 82,1%, что свидетельствует о наибольшей выраженности коалесцентных процессов в данном режиме течения. Для всей совокупности размеров капель при скорости 0,11 м/с эффективность разделения в среднем составляла около 80,4%. В интервале скоростей 0,02–0,05 м/с наблюдается рост эффективности примерно на 11,8% по сравнению с еще более низкими значениями скорости. Это может быть обусловлено тем, что при умеренном увеличении скорости возникает более активное турбулентное перемешивание, стимулирующее столкновение и слипание капель нефти, однако не сопровождается слишком мощным сдвиговым эффектом, способным разрушать формирующиеся агломераты.

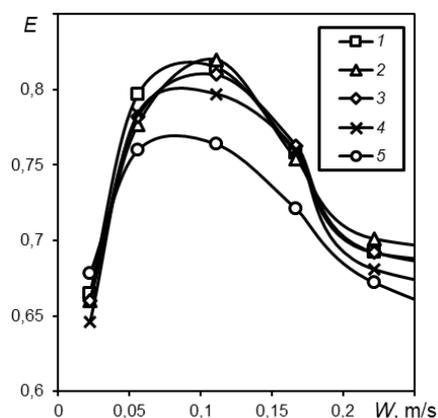


Рисунок 1 – Зависимость эффективности разделения водонефтяной эмульсии в отстойнике с гофрированными пластинами от скорости ее движения в зависимости от размера нефтяных глобул, мкм: 1 – 5, 2 – 20, 3 – 50, 4 – 100, 5 – 200

Вместе с тем при превышении скорости потока свыше 0,17 м/с эффективность заметно снижается в среднем на 7,1%. В таких режимах,

скорее всего, преобладают силы смешения, приводящие к дезагрегации капель, и совокупный вклад вихрей перестает работать на пользу разделению фаз, поскольку нефть в большей степени уносится потоком и не успевает всплыть в верхнюю часть аппарата. Полученные результаты подтверждают, что конструкция с гофрированными пластинами наиболее эффективна при умеренных скоростях протекания жидкости, где сформированные вихревые зоны обеспечивают достаточное время контакта и коалесценции нефтяных включений.

**Выводы.** 1. Использование гофрированных пластин, ориентированных под углом  $45^\circ$ , способствует формированию интенсивного вихревого потока и повышает эффективность разделения эмульсии. 2. Оптимальная скорость движения эмульсии в устройстве (около  $0,11$  м/с) обеспечивает максимальную степень расслоения, что подтверждается расчетными данными. 3. Увеличение линейной скорости выше  $0,17$  м/с снижает эффективность за счет усиленных процессов дезагрегации и уноса нефтяных частиц. 4. Размер глобул нефти существенно влияет на качество сепарации, при этом частицы среднего диаметра (около  $20\text{--}50$  мкм) достигают наиболее эффективного отделения в выбранных условиях.

#### Библиографический список

1. Сепарационное устройство с соосно расположенными трубами для разделения водонефтяных эмульсий / А. Р. Галимова, В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, В. В. Харьков // Вестник Технологического университета. – 2021. – Т. 24, № 3. – С. 50-54.

#### References

1. Separacionnoe ustrojstvo s soosno raspolozhennymi trubami dlja razdelenija vodoneftjanyh jemul'sij / A. R. Galimova, V. Je. Zinurov, A. V. Dmitriev, V. V. Har'kov // Vestnik Tehnologicheskogo universiteta. – 2021. – T. 24, № 3. – S. 50-54.