

*Багаева Т.В.,*

*студент*

*2 курс магистратуры, кафедра «Экология и промышленная безопасность»*

*МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Россия, г. Москва*

*Научный руководитель: Виноградов М.С.,*

*старший преподаватель кафедры «Экология и промышленная*

*безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА НАПОРНОГО ФЛОТАТОРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ СТОКОВ МЕТОДАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ**

*Аннотация:* В статье рассмотрено применение методов вычислительной гидродинамики (CFD) для оптимизации напорного флотатора, предназначенного для очистки сточных вод гальванического производства. Сравнительное моделирование базовой и модернизированной конструкций показало, что внедрение наклонных пластин снижает скорость в зоне сепарации с 50–60 до 3–10 мм/с, уменьшает градиенты скорости до 5–8 с<sup>-1</sup> и устраняет застойные зоны, стабилизируя течение до ламинарного режима. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенной модернизации для сохранения флотокомплексов и повышения степени извлечения тонкодисперсных загрязнений.

*Ключевые слова:* напорная флотация, гальванические сточные воды, вычислительная гидродинамика, ANSYS Fluent, тонкослойные модули, гидродинамическая стабилизация, флотокомплексы.

*Annotation:* This article examines the application of computational fluid dynamics (CFD) methods to optimize a pressure flotation unit designed to treat

wastewater from a galvanic production facility. Comparative modeling of the basic and upgraded designs revealed that the introduction of inclined plates reduces the velocity in the separation zone from 50–60 to 3–10 mm/s, decreases velocity gradients to 5–8 s<sup>-1</sup>, and eliminates stagnant zones, stabilizing the flow to a laminar regime. The results confirm the effectiveness of the proposed upgrade for maintaining flotation systems and increasing the recovery of fine contaminants.

**Key words:** pressure flotation, galvanic wastewater, computational fluid dynamics, ANSYS Fluent, thin-film modules, hydrodynamic stabilization, flotation complexes.

## 1. Введение

Гальваническое производство характеризуется образованием сложных многокомпонентных сточных вод, содержащих ионы тяжёлых металлов, цианиды, ПАВ и эмульгированные органические соединения [1]. Эффективность их очистки методами напорной флотации напрямую зависит от гидродинамической обстановки внутри флотационной камеры. Высокая турбулентность, наличие короткозамкнутых потоков и застойных зон приводят к разрушению формирующихся агрегатов «частица–пузырёк» (флотокомплексов), что снижает степень очистки на 20–30% по сравнению с расчётными значениями [2]. Традиционные аналитические методы расчёта не позволяют детально оценить локальные неоднородности потока, что обуславливает необходимость применения численного моделирования [3]. Целью данной работы является оптимизация гидродинамического режима флотатора производительностью 4 м<sup>3</sup>/ч путём внедрения тонкослойных модулей с верификацией результатов в программном комплексе ANSYS Fluent.

## 2. Материалы и методы моделирования

Трёхмерная геометрическая модель флотатора создана в КОМПАС-3D и импортирована в ANSYS Workbench 2024 R2. Габариты камеры:

2,0×1,0×0,8 м. Модель включает два входных патрубка (inlet\_1, inlet\_2), выходной патрубок (outlet), стенки аппарата и зону установки ламелей. Для дискретизации применён гибридный алгоритм poly-hexcore, обеспечивающий сочетание полиэдральных ячеек в сложных геометрических зонах и гексагональных в ядре потока [4]. Общий объём расчётной сетки составил ~1,7 млн ячеек. Минимальный размер ячейки в зонах контакта с пластинами и пограничных слоях принят 0,002 м, максимальный – 0,032 м. Применено 5 призматических слоёв у стенок с коэффициентом роста 1,2 для корректного разрешения вязкого подслоя.

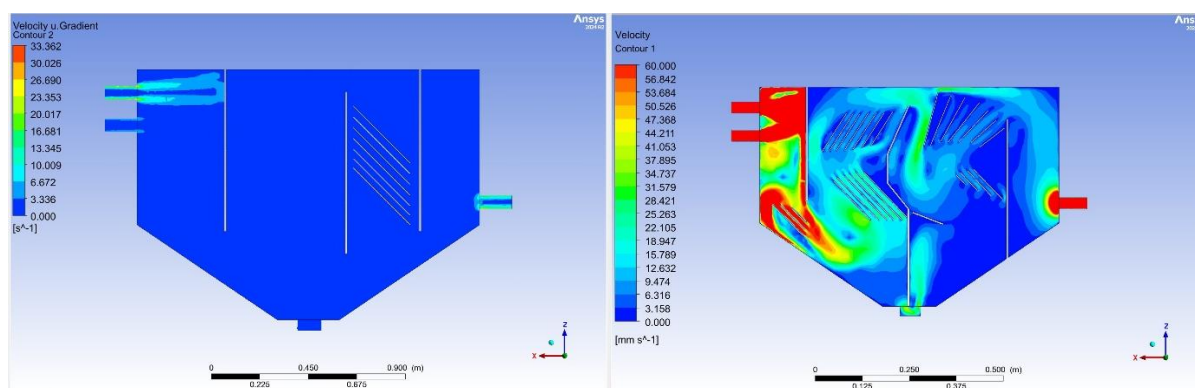
В качестве физической модели выбрана модель турбулентности k-ε Realizable с схемой Enhanced Wall Treatment, адекватно описывающая течения с отрывными зонами и анизотропией напряжений [5]. Инициализация проведена методом Hybrid Initialization. Граничные условия: Velocity Inlet на входах, Mass-Flow Outlet на выходе с массовым расходом 0,66 кг/с ( $\rho=1000$  кг/м<sup>3</sup>). Критерии сходимости: остатки уравнений импульса и неразрывности  $<10^{-5}$ .

### 3. Результаты

Анализ базовой конструкции (без ламелей) выявил критические гидродинамические неоднородности. В зоне входных патрубков формируются высокоскоростные струи со скоростью 50–60 мм/с, энергия которых транслируется вглубь камеры. В центральной части образуются крупные рециркуляционные зоны, занимающие до 30% полезного объёма. В зоне сепарации градиенты скорости достигают 25–30 с<sup>-1</sup>, что создаёт высокие сдвиговые напряжения, разрушающие хрупкие флотокомплексы (рис. 1) [6]. Распределение скоростей носит неравномерный характер с локальными пиками у стенок.

Для устранения выявленных недостатков в модель внедрён пакет наклонных тонкослойных пластин (угол 45–60°, шаг 25 мм). Повторный расчёт при тех же граничных условиях показал кардинальное изменение

картины течения. Тонкослойные модули выполняют функцию гидродинамического выпрямителя: высокоскоростные струи рассеиваются, поток разделяется на параллельные ламинарные струи в межпластинных каналах [7]. Максимальная скорость в рабочей зоне снизилась до 10–15 мм/с, а внутри каналов стабилизировалась на уровне 3–8 мм/с (рис.1). Градиенты скорости упали до 5–8 с<sup>-1</sup>, что минимизирует риск отрыва частиц от пузырьков. Крупные вихревые зоны исчезли, коэффициент использования рабочего объёма возрос до 98%.



***Рисунок 1. Базовая конструкция (слева); модернизированная (с ламелями) конструкция***

Полученные данные согласуются с многостадийной моделью флотации Б.С. Ксенофонтова, согласно которой вероятность обратного процесса (разрушения флотокомплекса) экспоненциально возрастает при превышении критических значений сдвиговых напряжений [6]. Внедрение ламелей обеспечивает переход в режим, благоприятный для укрупнения и всплытия агрегатов, без увеличения габаритов аппарата и энергозатрат на аэрацию.

#### 4. Заключение

Численное моделирование в ANSYS Fluent подтвердило высокую эффективность внедрения тонкослойных модулей в конструкцию напорного флотатора для очистки гальванических стоков. Оптимизированная геометрия обеспечивает снижение скорости потока в зоне сепарации до технологически оптимальных значений (3–10 мм/с), минимизацию градиентов скорости и

устранение застойных зон. Это создаёт условия, близкие к ламинарным, необходимые для сохранения целостности флотокомплексов и повышения степени извлечения тонкодисперсных загрязнений.

#### **Использованные источники:**

1. Казанцева Л.П. Экология гальванических производств. – СПб: Химиздат, 2008. – 256 с.
2. Виноградов М.С. Интенсификация флотационной очистки сточных вод энергопредприятий с использованием кондиционирующих камер: дис. ... канд. техн. наук. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – 129 с.
3. Степанов В.Н., Сидоренко А.А. Моделирование работы флотационных машин методами вычислительной гидродинамики // Водоснабжение и санитарная техника. – 2020. – № 5. – С. 45–52.
4. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 2024 R2. – ANSYS, Inc., 2024.
5. Губин Д.Г., Иванков М.А. Гидродинамика флотационных процессов // Химическая технология. – 2021. – Т. 22, № 3. – С. 112–118.
6. Ксенофонтов Б.С. Флотационные методы очистки воды. – М.: Химия, 1990. – 256 с.
7. Вайсберг Л.А., Дубровский В.А. Флотационные методы очистки сточных вод. – М.: Недра, 1986. – 184 с.