

# Процесс оптимизации вторичного отстойника с помощью вычислительной гидродинамики (CFD)

А. Шелестина\*, Х.Ратнавира

Norwegian University of Life Sciences, PO Box 5003-IMT, 1432 Aas, Norway

\* E-mail: oleksafu@nmbu.no; tel.: +47 451 90 625

## Аннотация

Цель исследовательской работы была изучить возможности вычислительной гидродинамики (CFD) и представить ее как новый инструмент для оптимизации процесса водоочистки, а именно процесса отстаивания. Работа включает в себя такие разделы как: введение, где представлена важность чистой воды и существующие методы ее очистки, процесс отстаивания как самый простой и эффективный процесс разделения твердой и жидкой фаз. В разделе «Материалы и методы» представлены определяющие уравнения численного решения CFD, представлен алгоритм процесса симулирования, модель турбулентности и смеси. В разделе «Результаты и выводы», представлены результаты симулирования реального вторичного отстойника и предложены пути и способы модернизации, а также были предложены модернизированные модели отстойников.

**Ключевые слова:** Вычислительная гидродинамика (CFD), вторичный отстойник, симуляция, модель турбулентности, модель смеси, модернизация, сточные воды.

## Введение

Все знают, что 70 % поверхности земли покрыты водой, и все равно во всем мире существует острая нехватка в питьевой воде. Причиной этого может быть то, что 97,5 процентов воды – соленая вода, и почти три четверти свежей воды находится в замороженном виде. Следовательно, более чем одна третья мирового населения это 2,4 миллиарда человека не имеют доступ к чистой воде. Главные вопросы, связанные с водой – ее качества и ее количество. Для достижения этих целей вода должна быть правильно очищенной.

Что такое процесс водоочистки? Водоочистной процесс это сложный, неразрывный процесс который состоит из нескольких стадий зависящих друг от друга: механическая очистка (фильтрация, очистка с помощью экрана), химическая очистка, процесс оседания, процесс дезинфицирования (озонирование, хлорирование, ультрафиолетовое излучение).

Оседания это самый простой и распространённый процесс разделения фаз в процессе водоочистке. На сегодняшний день, процесс оседания обычно используется для удаления примесей, которые были сформированы в ходе процесса коагуляции и флокуляции, флокулированные частицы оседают самопроизвольно на дне резервуара, в то время очищенный поток выходит из резервуара, эта процедура может удалить 50 -70% от взвешенных веществ, 25-40 % БПК от сточных вод (Rajvaidya and Markandey 1998). Несмотря на практическое значение отстойников, на сегодняшний день практика создания дизайна отстойника в основном зависит от эмпирических формул, которые не в полной мере могут описать гидродинамические процессы в системе. Факторы, которые влияют на производительность и эффективность отстойника: скорость входящего потока, дизайн отстойника, механизм удаления частиц, дизайн входа и выхода и т.д. Учет всех этих параметров крайне необходим для эффективного проектирования и эксплуатации отстойника. Традиционные методы проектирования отстойника работают

как «черный ящик», то есть мы можем наблюдать только внешние черты, но мы не имеем возможности заглянуть внутрь отстойника, и оценить какие процессы происходят под уровнем водой (Metcalf, 2002). Чтобы избежать эффекта "черного ящика", дорогостоящих, долгих и утомительных экспериментов Вычислительная гидродинамика (CFD) начала использоваться в течение последних десятилетий. С помощью CFD возможно предсказать поведение потока, симулировать процесс оседания до начала проектных работ, таким образом, избежав потенциальных ошибки.

Целью данной работы является показать перспективы использования, преимущества, и основные возможности CFD в технологии очистки воды с акцентом на процесс отстаивания. Предоставить механизм калибровки модели существующего отстойника который расположен в г. Drøbak, и предложить модернизированной модели для повышения эффективности процесса отстаивания. Как писал (Shilton, Glynn et al. 2010): "Мы должны только посмотреть на другие отрасли индустрии, чтобы увидеть, как CFD можно надежно использовать для комплексного дизайна. CFD это мощный инструмент, потенциал которого практически неосвоенный в водоочистных технологиях. Осознание этого растет с каждым днем, и не может быть никаких сомнений, что CFD будет виден больше и больше в будущем.

## 2. Материалы и методы

### 2.1 Теоретические основы CFD

Уравнения, которые используются для математического описания физики потока жидкости - уравнение неразрывности и уравнение импульса, также известное как уравнения Навье-Стокса и уравнения энергии, которые необходимы для описания состояния любого типа потока и, как правило решены для всех типов потоков в CFD моделировании, см. уравнение 1, 2 и 3 соответственно:

$$\text{Уравнение неразрывности: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla * (\rho * u) = 0 \quad (1)$$

$$\text{Уравнения Навье — Стокса: } \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla * (\rho u u) = -\nabla p + \nabla * \tau + \rho g \quad (2)$$

$$\text{Уравнение энергии: } \rho c_\mu \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_\mu U_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = -P \frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} - \tau_{ij} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad (3)$$

где:  $p$  – плотность,  $u$  – мгновенная скорость,  $p$  – давление,  $\tau$  – вязкость, and  $g$  – вектор тяжести.

### Модель турбулентности

Для симулирования процесса оседания в этом исследовании мы использовали стандартную к-ε модель, также известная как модели турбулентности. При увеличении скорость потока, число Рейнольдса будет превышать критическое число Рейнольдса, и следовательно весь поток будет перемешен и иметь хаотический и нестационарный характер - такой поток, мы называем турбулентный поток.

Стандартная к-ε модель включает в себя два основных уравнений. Это уравнение турбулентной кинетической энергии  $k$ , и уравнение энергии рассеивания  $\varepsilon$ .

$$\text{Турбулентная – кинетическая энергия: } \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\text{Уравнение энергии рассеивания: } \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P_k + C_{3\varepsilon} P_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

где:  $\mu$  – турбулентная вязкость,  $P_k$  – производство  $k$ ,  $P_b$  – эффект тянучести,  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ , и  $C_{3\varepsilon}$  – константы,  $\sigma_k$  and  $\sigma_\varepsilon$  – аге числа Прандтля.

### Модель смеси

Когда более чем одна фаза присутствует в потоке, и фазы находятся в разных физических состояниях, и с разными химическими свойствами – такой поток называется многофазным, или смесь. В многофазных моделях, основной трудностью является взаимодействие между фазами, для моделирования процесса, мы используем модель смеси, или многофазную модель. В соответствии с Ishii (1975) мы можем сформулировать уравнение непрерывности и импульса для каждой фазы.

Уравнение неразрывности: 
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla(\rho_m \vec{V}_m) = m \quad (4)$$

Уравнение импульса: 
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{V}_m) + \nabla(\rho_m \vec{V}_m \vec{V}_m) = -\nabla p + \nabla[\mu_m(\nabla \vec{V}_m + \nabla \vec{V}_m^t)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla * (\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{V}_{dr,k} \vec{V}_{dr,k}) \quad (5)$$

где:  $\vec{V}_m$  - масса усредненная по скорости,  $\rho_m$  – плотность смеси,  $\mu_m$  - вязкость смеси,  $\vec{V}_{dr,k}$  - скорость дрейфа второй фазы.

### 2.2 Начальные и граничные условия процесса симуляции горизонтального отстойника

Полномасштабный - горизонтальный вторичный отстойник был исследован на базе завода по очистке сточных вод в г. Drøbak . Источником сточной воды являются жилые дома города. Завод рассчитан на мощность около 400 м<sup>3</sup>/h. Процесс предварительной очистки включает в себя процесс коагуляции и флокуляции, и после этого, вода идет прямо в два горизонтальных отстойника через входящие трубы с диаметром 500 мм каждая, и расположенных на 2 м ниже уровня воды. При входе в отстойники, располагаются две перегородки на расстоянии 500 мм от входа, и с диаметром 500 мм каждый. Осадок выводится с отстойника через выпускные трубы осадка приемника, а чистая вода выводится из отстойника через три выходных желоба, две с длиной 20 м, и центральная с длиной 14,2 м, глубина желобов равна около 22 см, и шириной 500 мм.



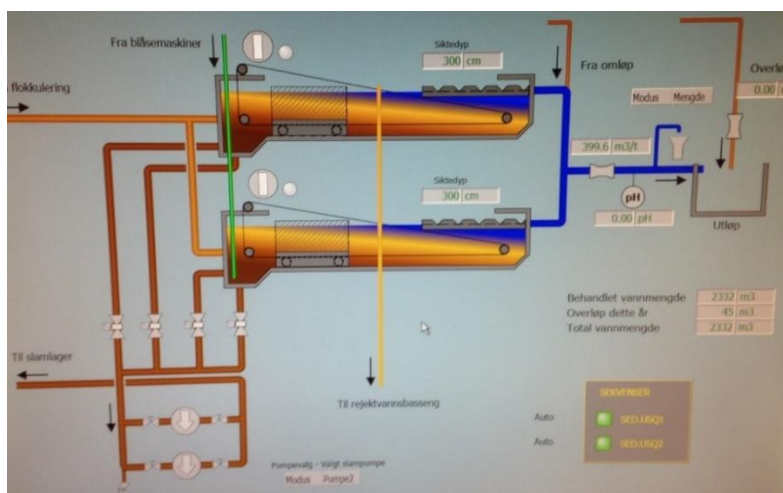


Рисунок 1. Горизонтальный отстойник на заводе по очистке сточных вод в г.Дрёбак

Для симуляции процесса отстаивания, были использованы такие начальные условия как: на входе –входящая скорость, на выходе – количество выходящего потока. Геометрическая модель отстойника была спроектирована с помощью программного обеспечения GAMBIT и полностью соответствует оригинальному геометрическому отстойнику. Модели CFD используются для описания поведения многофазного потока с помощью Ёйлер – Ёйлер подхода и мультифазной модели смеси. Первичная фаза – вода, с плотностью  $1000 \text{ кг/м}^3$  и вязкостью  $0.001 \text{ кг/м}^*\text{с}$ , Вторичная фаза – осадок, с плотностью  $1200 \text{ кг/м}^3$  и вязкостью  $0.01 \text{ кг/м}^*\text{с}$  и диаметром частиц  $0.1 \text{ мм}$ , объемная доля осадка  $5 \%$

### 3. Результаты и выводы

#### 3.1 RTD симуляция однафазной модели с помощью трасирующего теста

Коммерческое программное обеспечение Fluent было использовано для изучения и моделирования потока, и ценки гидравлической производительности отстойника. Описание полного алгоритма RTD симулирования с помощью трасирующего теста приведена в Приложении 3. Существует два способа проведения трасирующего теста (Е-тип) and пошаговый метод ( F-тип) ( USEPA.2003)

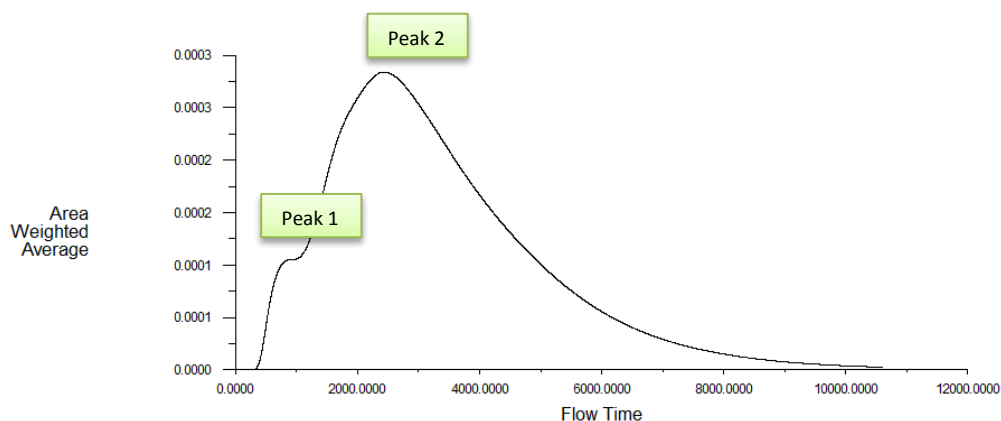


Рисунок 2. RTD кривая оригинального отстойника, Е -тип

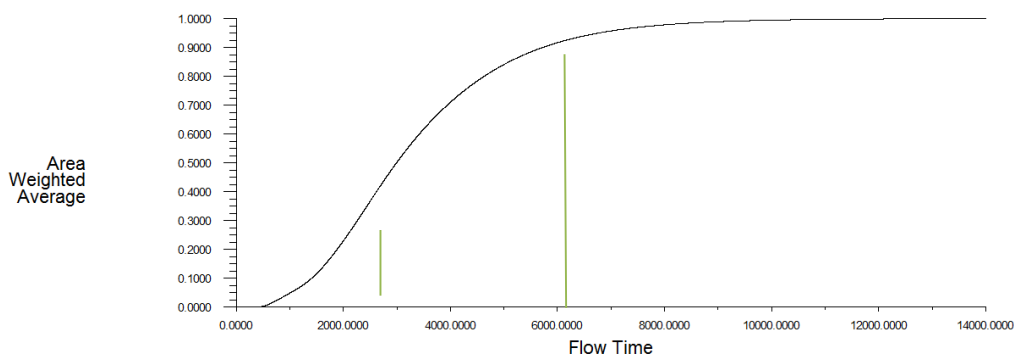


Рисунок 3. RTD оригинального отстойника, F –тип

Проанализировав эти две кривые, мы можем сделать вывод что они совпадают, каждая из них имеет два пика. Что указывает на потенциальные операционные проблемы в отстойнике. На первой кривой (E –тип), мы можем наблюдать первый маленький, острый пик который соответствует малому объёму из-за коротких замыканий в потоке, и сильного поверхностного натяжения. Мы можем сделать вывод что  $t_{10}$  высокое – это время за которое 10 % входящей концентрации было замечено на выходе из отстойника. Как видно из Фигуры 2, первый пик находится в диапазоне от 0 до около 500 с после ввода трассера. Второй пик появляется в пределах около 1500 с, и может быть объяснён ре-циркуляцией потока. Позже, RTD кривая показывает уменьшение в квази – экспоненциальном виде под влиянием сильного плотностного напряжения около дна. В соответствии с фигурой 3, более чем 15 % трассера дошло до выхода в течении первого периода, что указывает на короткое время удержания.

### 3.2 RTD симуляция на основа завода по очистке сточных вод в г. DrøbakWWTP

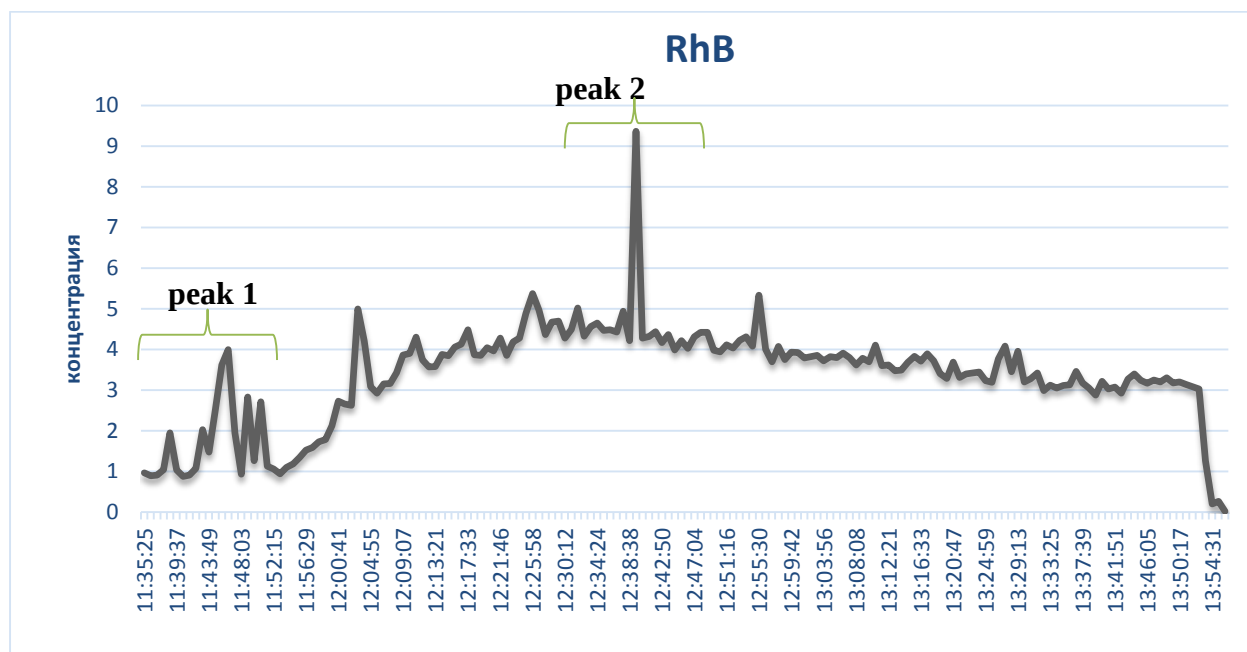


Рисунок 4. RTD график на основе реального отстойника на базе завода по очистке сточных вод в г. Drøbak

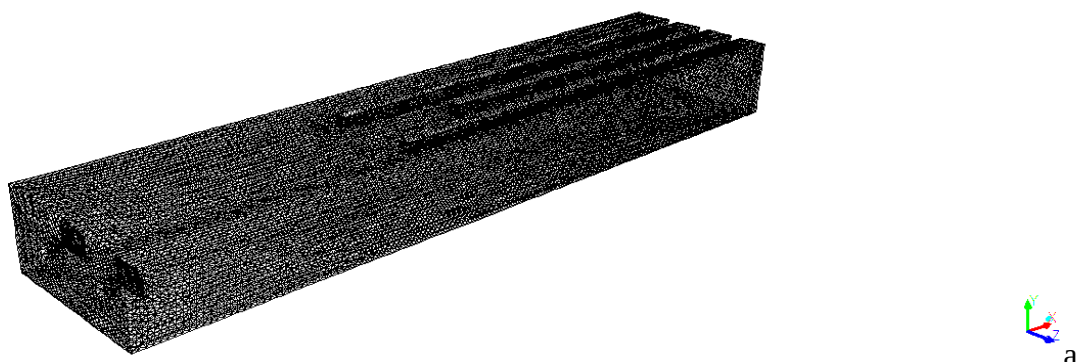
После сравнительного анализа этих двух кривых (моделирования и реального трассёра теста), мы можем с уверенностью сказать, что они имеют похожую форму, и обе имеют два пика. Что явно указывает на то что, компьютерное моделирование на базе CFD программного обеспечения может быть использован как альтернатива реальным

экспериментам для дальнейших исследований. Посмотрев на эти кривые, мы можем заметить феномен 2-х пиков. Какова причина? Это может быть из-за коротких замыканий потока в отстойнике, малого времени удержания потока или просто не достаточно правильного дизайна отстойника.

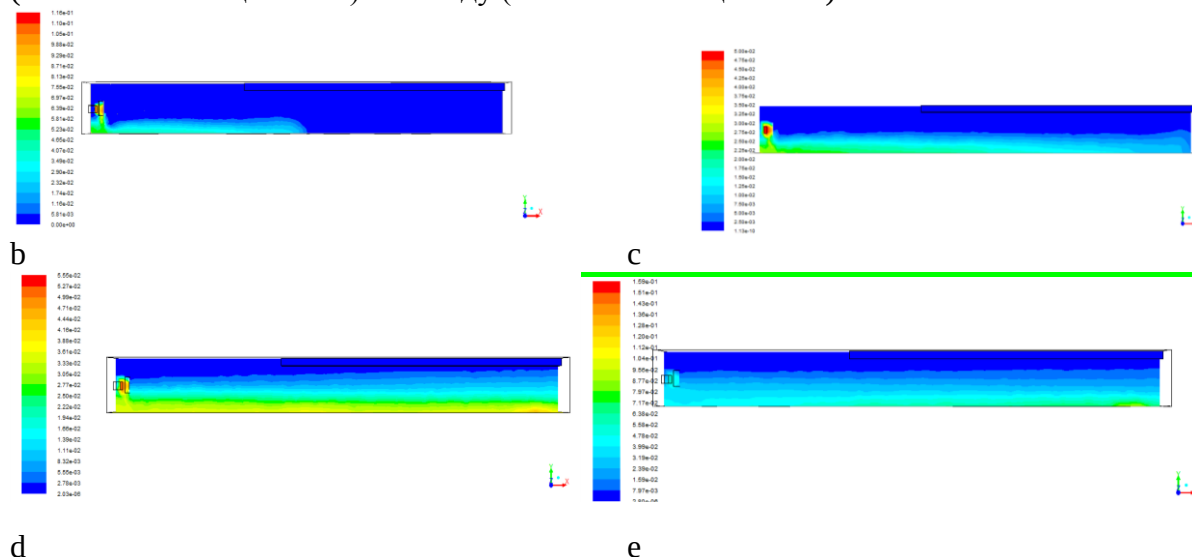
### 3.3 Результаты многофазного моделирования реального отстойника

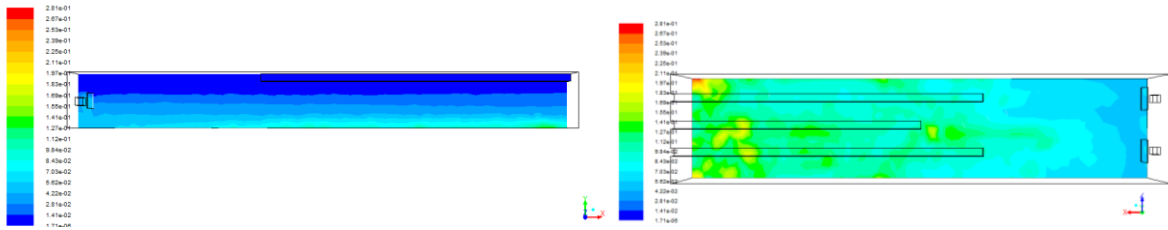
#### 3.3.1 Результаты много-фазного моделирования на основе реального отстойника

На Рисунке 5 представлена геометрическая модель существующего отстойника для CFD моделирования, которая была построена с помощью программного обеспечения GAMBIT. Все геометрические размеры были сохранены, и полностью соответствуют реальному отстойнику на заводе по очистке сточных вод в г. Drøbak. Алгоритм многофазного моделирования представлен в Приложении 4.



На рисунках (b) - (g) представлена эволюция распределения объемной доли осадка по дну отстойника после 100 с, 200с, 500с, 1000с, 2000с на плоскости XY. Для построения графика распределения осадка по дну отстойника была использована линия распределения, и результаты представлены на графике (I) в диапазоне от входа (начальная позиция -16м) к выходу (конечная позиция 16 м) после 2000 с.

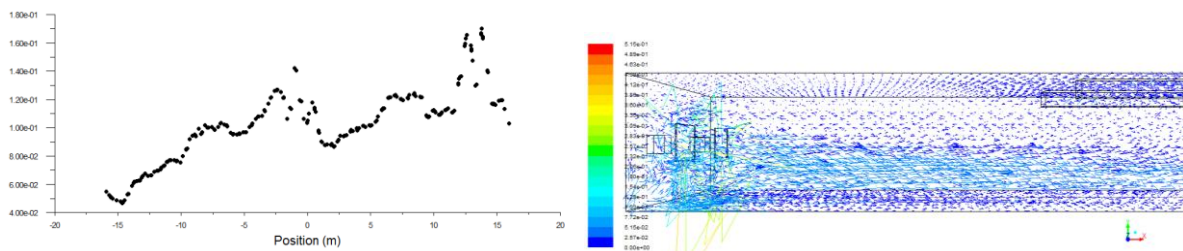




f

g

На рисунках 5 f – g мы можем увидеть, что все частицы осели и были распределены по дну отстойника, но большая часть частиц была сдвинута в сторону выходного потока, и это опасно тем что часть частиц может попасть в поток с очищенной водой и выйти из отстойника, что видно из графика (i). Этот феномен может быть связан с тем, что из-за малых перегородок, входящий поток распыливается по стенам отстойника – обходя центральную часть, и тем самым создавая «мертвые зоны». Скорость потока не снижается, и более того на рисунке 5.h – график распределения векторной скорости, указывает на наличия возвращающего потока, таким образом образуя воронки и циркуляционный поток.



i

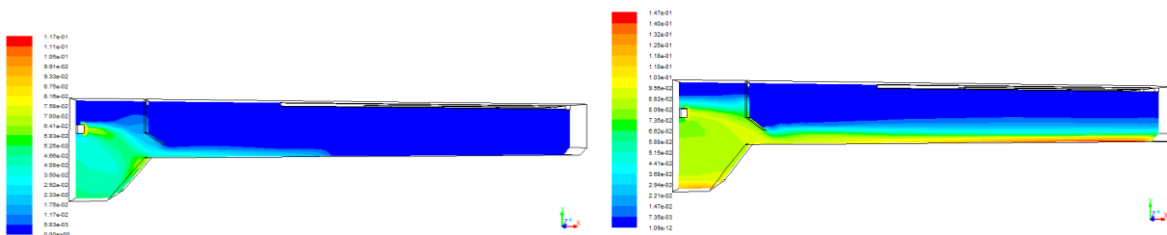
h

Рисунок 5. Распределение потока по оригинальному отстойнику. (b) – (g) распределение объёмной доли осадка на u-z координате; (i) график распределения осадка по дну; (h) – векторная скорость

### 3.3.2 Результаты многофазного моделирования модернизированного отстойника с 2 м расширенной перегородкой и осадка - приемником



a



b

c

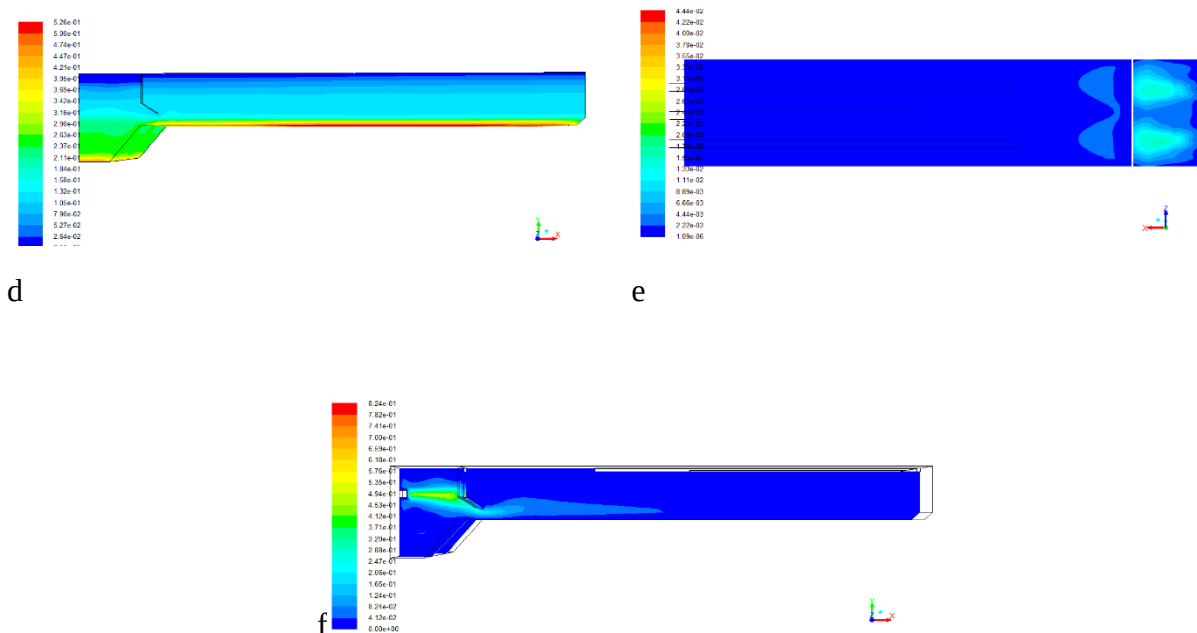
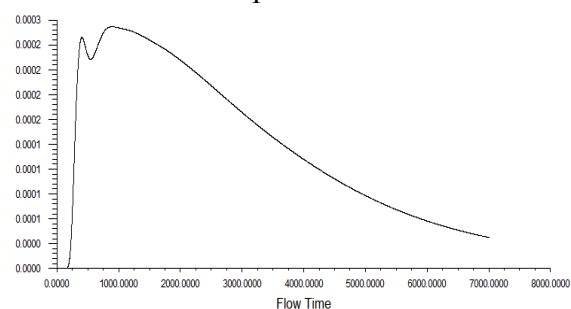


Рисунок 6 (а)–(е). Распределение объемной доли осадка со временем в модернизированном отстойнике с 2 м перегородкой

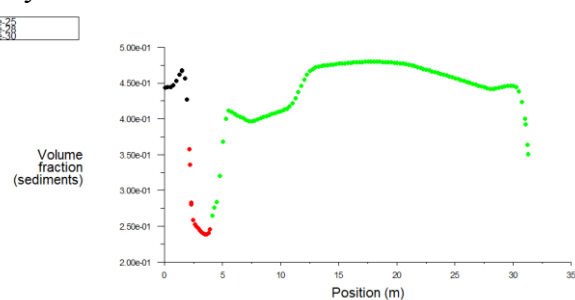
Анализ литературы показал, что циркуляционные регионы и высокую турбулентную активность в отстойнике можно снизить с помощью внедрения правильного количества перегородок с правильной формой (Krebs et al. 1995). Goal et.al. (2008) обнаружили, что наличие расширенной перегородки обеспечивает лучшее перемешивание у входа, и разграничивание между входом и выходом из отстойника чем маленькие перегородки. Следовательно, значительно улучшая процесс оседания.

Нами было смоделирована модернизированная модель отстойника с несколькими изменениями в граничных условиях и дизайн отстойника также был изменен. Этот отстойник имеет расширенную, изогнутую перегородку, которая расположена на расстоянии 2 м от вход, и также осадка приемник был внедрен. Скорость входящего потока определена как граничная величина и равна 0,8 m/s, и скорость входящих частиц равна 0.8 m/s.

На рисунках 6 (а) – (д) представлено распределение объемной доли осадка в течение времени. Рисунок 6 (е) показывает интенсивность распределения кинетической энергии. Как мы можем видеть, большая часть осадка осела в осадка приемнике, но оставшаяся часть была сдвинута к выходу из отстойника обходящим потоком (Фиг.6 f), который образовался из-за малого расстояния и новообразовавшейся зоной скорости между перегородкой и входом. Как мы можем видеть из RTD графика, первый пик был уменьшен что указывает на то что поток стал более ближе к «потока идеального вытеснения» - который является обязательным условиям идеального потока вытеснения.



g



i

Что бы избежать обходящий поток вокруг перегородки, было предложено отодвинуть перегородку на расстояние 4 м, результаты представлены на фигуре 7 (a –e).

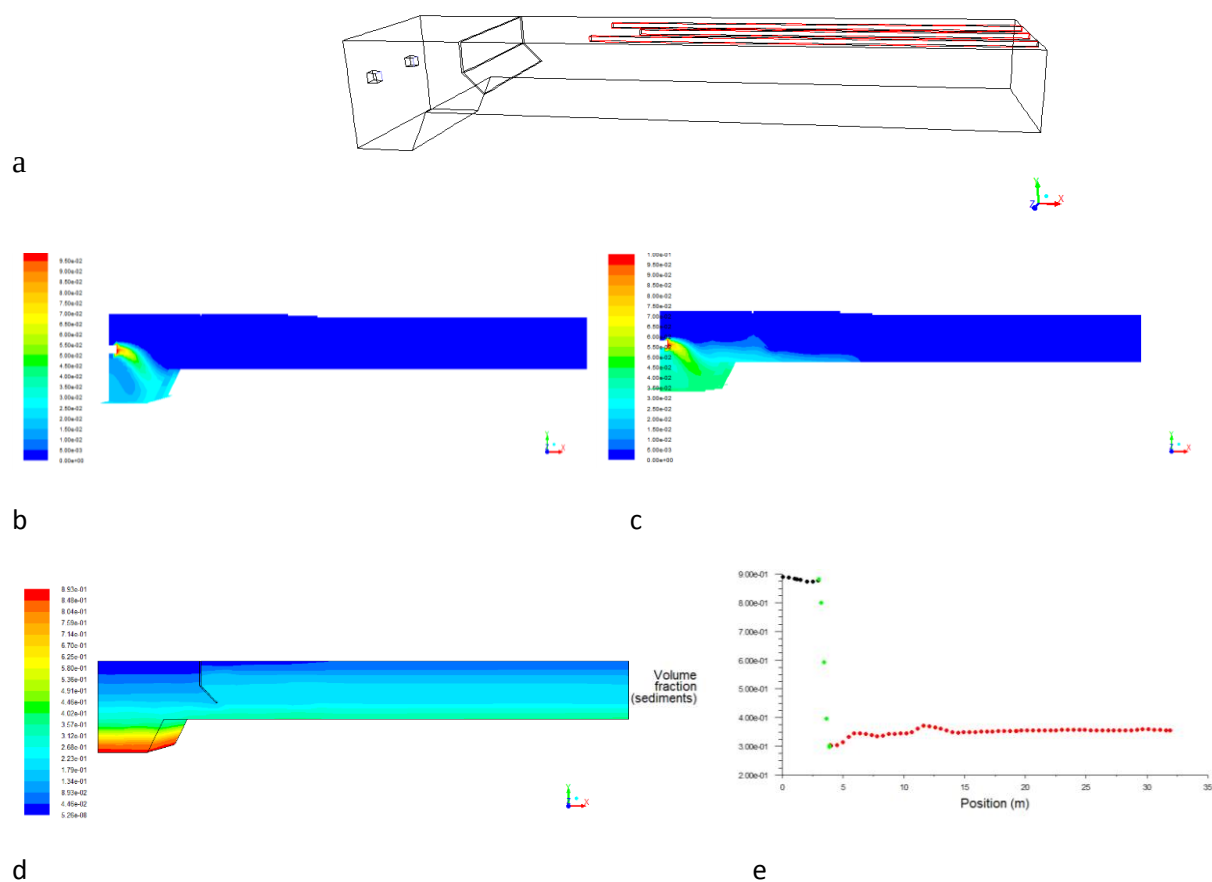
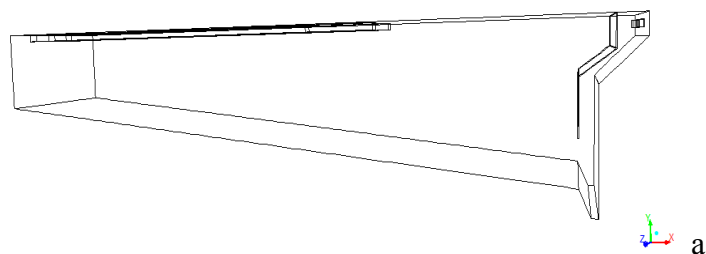


Рисунок 7 (a) – (e). показывает, что 4 м перегородка уменьшает кинетическую турбулентную энергию, и обходящий поток. На графике распределения объёмной доли осадка указывает на то что 60 % осадка осели по дну, что указывает на явные улучшения процесса оседания.

### 3.3.3 Результаты многофазного моделирования модернизированного отстойника с наклонным дном 12.5° и расширенной перегородкой.

Для того что бы направить поток жидкости значительно глубже внутрь отстойника, а также уменьшить интенсивность турбулентной кинетической энергии, мы предложили такую модернизированную форму отстойника как.



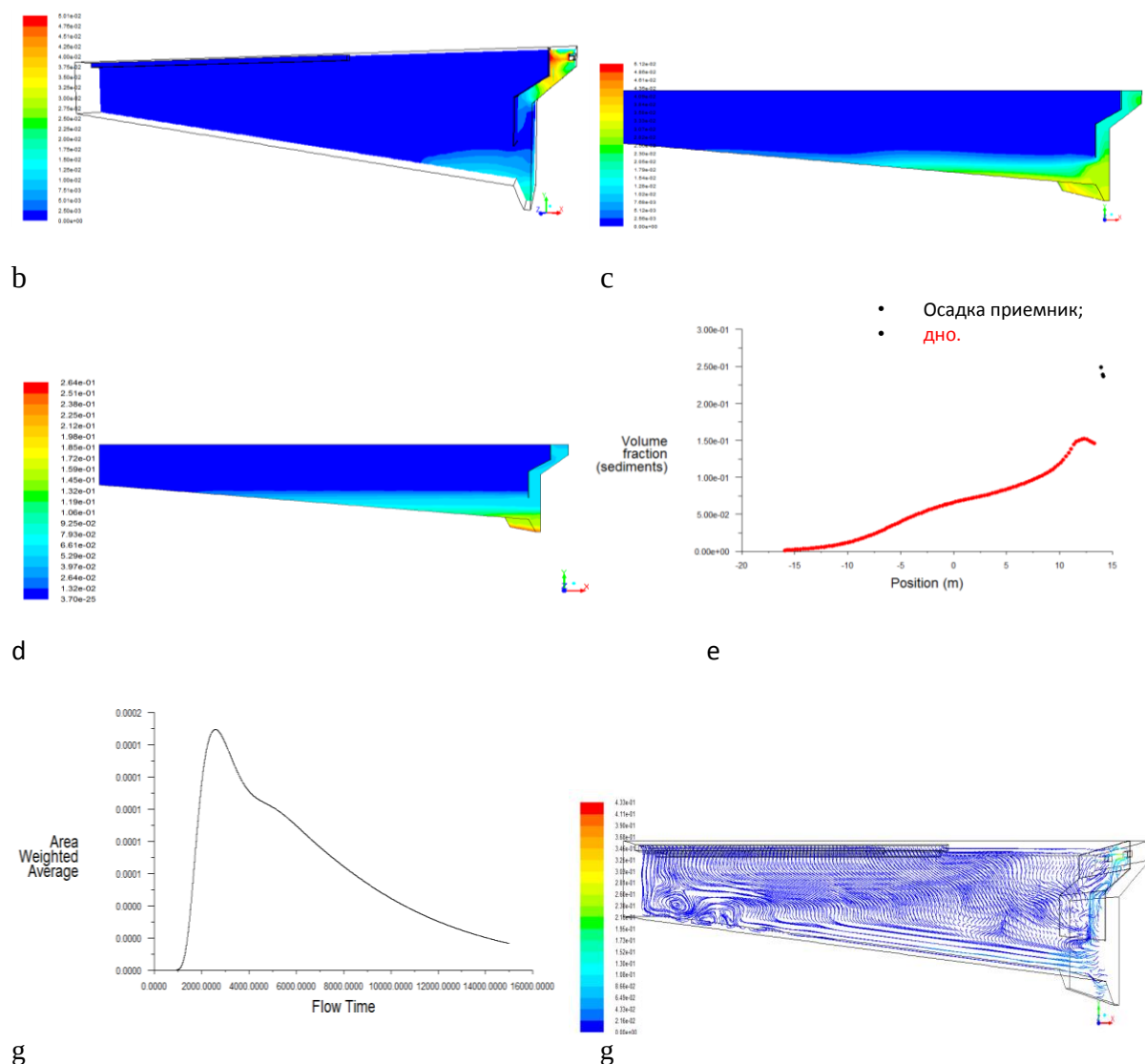


Рисунок 8. Результаты моделирования процесса отстаивания в модернизированном отстойнике. Распределение объемной доли осадка со временем (b) 100 s, (c) 800 s, (d) 1500 s., (e) – график распределения объемной доли осадка по дну отстойника. (f) - RTD кривая.

Рисунок 8 (a) – (c) показывает эволюцию распределения плотности потока в отстойнике. Результаты показывают, что расширенная и удлиненная перегородка направляет поток быстрее в направлении нижней части бака и уменьшает зону рециркуляции на входе. График RTD показывает результаты которые более всего похожи на график потока "идеального вытеснения". Результаты влияния расширенной перегородки показано на фигуре 8.d, и мы можем видеть, что 90% осадка находится в осадка приемнике.

## Выводы

Данная научная работа была связана с развитием и изучением вычислительной гидродинамики (CFD) как нового инструмента для оптимизации процесса водоочистки. Анализ существующего отстойника указал на наличие ряда операционных проблем во вторичном отстойнике по очистке сточных вод, таких как короткое время удержания потока, «мертвые зоны», короткие замыкания потока, сильное поверхностное натяжения, подводное натяжения и в общем плохой дизайн. После анализа существующего отстойника, было предложено несколько модернизированных моделей,

мы можем сделать вывод что наличие перегородки значительно увеличивает осадительную производительность. Моделирование показывает, что перегородки на расстоянии 2 м и 4 м снижают кинетическую турбулентную энергию, зоны рециркуляции и обходной поток. Наличие перегородки, к сожалению, может сдвигать осадок к выходу из отстойника, но эта проблема решается наличием осадка приемника, которые были представлены в других модернизированных моделях. После оценки всех достоинств и недостатков, была представлена модернизированная модель, с наклоненным дном 12.5 °, и расширенной перегородкой. Расширенная перегородка направляет весь осадок сразу в осадок приемник, и уменьшает зоны рециркуляции. График RTD показывает самые близкие результаты к графику «идеального вытеснения». Распределения объемной доли осадка в осадка приемнике увеличен до 90 %.

В заключения, мы можем с уверенностью сказать, что CFD может быть мощным инструментом для моделирования процесса осаждения и вообще для других методов очистки воды. CFD дает нам глубокое понимание о внутренних гидродинамических процессах, помогает нам избежать эффекта "черного ящика", утомительных, трудоемких и дорогих экспериментов. CFD дает новые идеи, новые возможности что бы открыть новые пути и способы очистки воды.

## Список литературы

- Anderson, J.D. (1995). Computational fluid dynamics (Vol.206). New York: McGraw-Hill.
- ANSYS Inc. (2009). ANSYS Fluent 14.0 Theory Guide.
- Goula, A. M., Kostoglou, M., Karapantsios, T. D., and Zouboulis, A. I.(2008). “A CFD methodology for the design of sedimentation tanks in potable water treatment case study: The influence of a feed flow control baffle.” [Chem. Eng. J., 140\(1–3\), 110–121.](#)
- Ishii, M. 1975. Thermo-fluid Dynamics Theory of two-phase Flow. Paris: Eyrolles.
- Shilton, A., et al. (2010). "An inside look-the potential of CFD technology."
- Krebs P., Vischer D., Gujer W. Inlet-structure design for final clarifiers //Journal of environmental engineering. – 1995. – Т. 121. – №. 8. – С. 558-564.
- Metcalf, E. (2002). Wastewater engineering: treatment and reuse. McGraw – Hill, New York.
- Rajvaidya, N., & Markandey, D. K. (1998). Advances in Environmental Science and Technology. Vol 7:Treatment of Pulp-and Paper Industrial Effluent. New Delhi: A P H Pub. Corp.
- USEPA (2003). "Tracer-Test Planning Using the Efficient Hydrologic Tracer-Test Design (EHTD) Program."
- Crowe, C.T., Schwarzkopf, J.D., Sommerfeld and M., Tsuji, Y. (2012): Multiphase Flows with Droplet and Particles 2nd edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida.
- Thome, J.R. (2004): Engineering Data Book III, Wolverine Tube Inc., Decatur, Alabama, USA
- Wanot, J., 1996. Computational fluid dynamics methods in ship design. R&D projects (1996), Germany.
- Wright, N., and D. Hargreaves. "The use of CFD in the evaluation of UV treatment systems." Journal of Hydroinformatics 3 (2001): 59-70.
- Amini, R., Taghipour, R., Mirgolbabaei, H. , Numerical assessment of hydrodynamic characteristics in chlorine contact tank. “International Journal for Numerical Methods in Fluids” (2011): 885-898.
- Wang H, Falconer RA. Numerical modelling of flow in chlorine disinfection tanks. Journal of Hydraulic Engineering (ASCE) 1998; 124(9):918–931.
- Membrane distillation heat transfer enhancement by CFD analysis of internal module geometry
- Cipollina, G. Micale, L. Rizzuti [Desalination and Water Treatment](#) Vol. 25, Iss. 1-3, 2011

A. Prosperetti and G. Tryggvason (2007). "Computational Methods for Multiphase Flow." Cambridge University Press.

A. Tom (1933). "The Flow Past Circular Cylinders at low Speeds." Proc. Royal Society, A141: 651-666.

Adamsson, Å. (1999). "Computational fluid dynamics for detention tanks."

Andy Shilton, D. G., Paddy Phelps (1999). "An inside look - the potential of CFD thechnology." Water **21**: 37-38.

Cipollina, A., et al. (2011). "Membrane distillation heat transfer enhancement by CFD analysis of internal module geometry." Desalination and Water Treatment **25**(1-3): 195-209.

Cockburn, B., et al. (2000). The development of discontinuous Galerkin methods, Springer.

Glover, G., et al. (2006). "Modelling of wastewater treatment plants how far shall we go with sophisticated modelling tools?" Water Science & Technology **53**(3): 79-89.

Guide, F. U. s. (2006). "FLUENT 6.3 User's Guide."

Huggins, D. L., et al. (2005). "Use of computational fluid dynamics (CFD) for aquaculture raceway design to increase settling effectiveness." Aquacultural engineering **33**(3): 167-180.

Jarvis, P., et al. (2005). "A review of floc strength and breakage." Water Research **39**(14): 3121-3137.

Johnson, F. T., et al. (2005). "Thirty years of development and application of CFD at Boeing Commercial Airplanes, Seattle." Computers & Fluids **34**(10): 1115-1151.

Kostoglou, M., et al. (2006). "Modeling local flotation frequency in a turbulent flow field." Advances in Colloid and Interface Science **122**(1-3): 79-91.

Niyogi, P. (2006). Introduction to computational fluid dynamics, Pearson Education India.

Shilton, A., et al. (2010). "An inside look-the potential of CFD technology."

USEPA (2003). "Tracer-Test Planning Using the Efficient Hydrologic Tracer-Test Design (EHTD) Program."

Versteeg, H. K. and W. Malalasekera (1996). "An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method." Longman Scientific, London.