

ФИЗИКАЛЫҚ ПРОЦЕСТЕР МЕН МЕХАНИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІ МОДЕЛЬДЕУ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
MODELING OF PHYSICAL PROCESSES AND MECHANICAL SYSTEMS

МРНТИ 27.35.45

10.51889/2959-5894.2023.84.4.006

Г.Т. Балакаева¹, Г.Б. Калменова^{1}, Д.К. Даркенбаев¹*

*¹Казахский Национальный университет имени Аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан
e-mail: kalmenova.g.b@gmail.com

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТЕШЛАМОВ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ
ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТХОДОВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

Аннотация

В статье предлагается один из вариантов решения проблемы защиты окружающей среды от вредных веществ, содержащихся в нефтеотходах. Исследована переработка нефтешламов. Проведен анализ методов и технологий переработки нефтешламов, для моделирования рассмотрен термический метод. Построенная нами математическая модель описывает процессы тепломассообмена при испарении вредных веществ из нефтешламонакопителя для минимизации воздействия отходов на окружающую среду. Проведено численное решение задачи. Расчеты проводились для сравнения с экспериментальными данными других авторов при различных температурах и скоростях. Проведен обширный вычислительный эксперимент, анализ которого показал, что полученные результаты правильно описывают закономерности тепломассообмена и испарения вредных веществ при термической обработке нефтешлама. Разработан программный комплекс с визуализацией и интеграцией данных с использованием инструментов Python. Исследования проводились с целью обеспечить возможность очистки нефтешламов и снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Ключевые слова: нефтешлам, термическая переработка, метод переменного направления, программное обеспечение.

Г.Т. Балакаева¹, Г.Б. Калменова^{1}, Д.К. Даркенбаев¹*

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

ҚОРШАҒАН ОРТАҒА ӘСЕРІН АЗАЙТУ ҮШІН МҰНАЙ ШЛАМЫН ӨНДЕУДІ МОДЕЛЬДЕУ

Аңдатпа

Мақалада мұнай қалдықтарының құрамындағы зиянды заттардан қоршаған ортаны қорғау мәселесін шешу нұсқаларының бірі ұсынылған. Мұнай шламын өңдеу зерттелді. Мұнай шламын өңдеу әдістері мен технологияларына талдау жүргізіліп, модельдеу үшін термиялық әдіс қарастырылды. Біз құрастырған математикалық модель қалдықтардың қоршаған ортаға әсерін барынша азайту үшін мұнай шламын сақтайтын резервуардан зиянды заттардың булануы кезіндегі жылу және масса алмасу процестерін сипаттайды. Есептің сандық шешімі орындалды. Есептеулер әртүрлі температура мен жылдамдықта басқа авторлардың тәжірибелік деректерімен салыстыру үшін жүргізілді. Кең көлемді есептеу эксперименті жүргізілді, оның талдауы нәтижесінде алынған нәтижелер мұнай шламын термиялық өңдеу кезінде зиянды заттардың жылу және масса алмасу және булану заңдылықтарын дұрыс сипаттайтынын көрсетті. Python құралдарын пайдалана отырып, визуализациясы және деректер интеграциясы бар бағдарламалық пакет әзірленді. Мұнай шламын тазарту мүмкіндігін қамтамасыз ету және қоршаған ортаға теріс әсерді азайту мақсатында зерттеулер жүргізілді.

Түйін сөздер: мұнай шламы, термиялық өңдеу, айнымалы бағыт әдісі, бағдарламалық қамтамасыз ету.

G.T. Balakayeva¹, G.B. Kalmenova^{1*}, D.K. Darkenbayev¹
¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

MODELING OF OIL SLIME PROCESSING TO MINIMIZE WASTE EFFECTS ON THE ENVIRONMENT

Abstract

The article proposes one of the options for solving the problem of protecting the environment from harmful substances contained in oil waste. The processing of oil slime has been investigated. The analysis of methods and technologies for processing oil slime is carried out, a thermal method is considered for modeling. The mathematical model we have constructed describes the processes of heat and mass transfer during the evaporation of harmful substances from the oil slime reservoir to minimize the impact of waste on the environment. The numerical solution of the problem is carried out. The calculations were carried out for comparison with experimental data of other authors at different temperatures and speeds. An extensive computational experiment was carried out, the analysis of which showed that the results obtained correctly describe the regularities of heat and mass transfer and evaporation of harmful substances during thermal treatment of oil slime. A software package with visualization and data integration using Python tools has been developed. The studies were carried out to make it possible to clear the oil slime and reduce the negative impact on the environment.

Keywords: oil slime, heat treatment, alternating direction method, software.

Введение

Нефтяная промышленность является ведущей отраслью экономики одной из нефтедобывающих стран мира – Казахстана и во многом определяет экономику, социальную политику, состояние окружающей среды. Производственную деятельность в стране осуществляют ряд предприятий нефтегазодобывающей и нефтегазоперерабатывающей промышленности, а также транспортировки углеводородов [1].

Проблема влияния предприятий нефтегазовой отрасли на состояние водной экосистемы, атмосферного воздуха и почвы многогранна. Наиболее опасными загрязнителями окружающей среды являются нефтешламы. В то же время это ценное вторичное сырье, которое можно использовать в различных отраслях промышленности. Несмотря на то, что на предприятиях нефтегазовой отрасли накоплено большое их количество, степень утилизации и использования отходов низкая, что приводит к концентрации нефтесодержащих отходов на полигонах и в шламонакопителях [2]. Все это оказывает негативное воздействие на окружающую среду из-за превышения нормативов качества почвы, грунтов, подземных и поверхностных вод, создавая тем самым реальную угрозу здоровью человека. В регионах с развитой системой нефтедобычи, как правило, формируются основные районы загрязнения нефтешламами – это Западная часть Казахстана, Кызылорда, Павлодар и Шымкент из-за большого объема разлитой нефти на нефтяных месторождениях, бурении отходы, нефтепереработка и аварии на нефтепроводах.

Ежегодно в нашей стране во время переработки или транспортировки нефти, в результате стихийных разливов и аварий образуется порядка 400 тыс. тонн нефтеотходов, а ресурсы, находящиеся в земляных амбарах, оцениваются в 4,5 млн. тонн. Для Казахстана, занимающего 12-е место среди 49 государств с запасами нефти в мире с запасами в 30 млрд баррелей, переработка нефтяных отходов очень важна. Таким образом, переработка нефтешламов на основе утилизации отходов для обеспечения экологической безопасности природных экосистем является актуальной. В Казахстане актуальность этой проблемы впервые была подчеркнута в Экологическом кодексе РК (2007 г.).

Загрязнение почвы нефтешламами представляет собой серьезную экологическую проблему, которая может иметь далеко идущие последствия для экологии и здоровья человека. Нефтешламы – это полутвердые отходы, образующиеся при переработке сырой нефти. Он содержит сложную смесь углеводородов, воды, твердых частиц и загрязняющих веществ, что

делает его серьезным загрязнителем при загрязнении почвы. Здесь мы рассмотрим причины, последствия и методы устранения загрязнения почвы нефтешламами.

Причины загрязнения почвы нефтешламами:

Случайные разливы. Случайные разливы во время транспортировки, хранения или обращения с нефтешламами могут привести к прямому загрязнению почвы. Утечки в резервуарах для хранения, трубопроводах или промышленные аварии являются частыми источниками таких разливов.

Неправильная утилизация. Неправильные методы утилизации, такие как сброс нефтешлама на открытых площадках или неправильные методы обращения с отходами, могут привести к долгосрочному загрязнению почвы.

Устаревшие объекты. На старых промышленных объектах, возможно, не внедрены современные методы обращения с отходами и их локализации, что со временем увеличивает риск загрязнения почвы.

Последствия загрязнения почвы нефтешламами:

Экологический ущерб. Нефтешламы содержат вредные химические вещества и тяжелые металлы, которые могут проникать в почву, загрязняя грунтовые воды и нанося вред близлежащим экосистемам. Это загрязнение нарушает естественный баланс почвенных организмов и растительности.

Загрязнение воды. Нефтешламы могут мигрировать из загрязненной почвы в грунтовые воды, реки и озера, что приводит к загрязнению воды. Это может иметь каскадные последствия для водных организмов и водопользователей, находящихся ниже по течению.

Риски для здоровья. Загрязненная почва может представлять опасность для здоровья людей при прямом контакте или проглатывании загрязненной воды или сельскохозяйственных культур. Воздействие опасных веществ в нефтешламах может привести к различным проблемам со здоровьем, включая рак, проблемы с дыханием и кожные заболевания.

Экономическое воздействие. Загрязнение почвы может снизить стоимость земли, ограничить возможности землепользования и увеличить затраты на очистку и восстановление окружающей среды.

Очистка почвы от загрязнения нефтешламами:

Рекультивация почв, загрязненных нефтешламами, – сложный и зачастую дорогостоящий процесс. Выбор метода восстановления зависит от таких факторов, как степень загрязнения, условия на объекте и нормативные требования. К распространенным методам исправления относятся:

Раскопки и удаление. Сильно загрязненную почву можно выкопать и транспортировать в безопасное место захоронения. Этот метод эффективен, но может быть дорогостоящим и может привести к нарушению окружающей среды.

Биоремедиация. Микроорганизмы используются для расщепления углеводородов в нефтешламе. Этот метод экологически безопасен и может быть эффективен при менее сильных загрязнениях.

Химическое окисление. Химические вещества вводятся в почву для окисления и разложения загрязняющих веществ. Этот метод эффективен для очистки стойких углеводородов.

Извлечение паров почвы. Летучие органические соединения удаляются путем создания вакуума в почве, в результате чего загрязняющие вещества испаряются.

Фиторемедиация. Некоторые растения могут поглощать и накапливать загрязняющие вещества из почвы. Фиторемедиация особенно полезна при низких и умеренных уровнях загрязнения.

Затвердевание и стабилизация на месте. В почву добавляются химические агенты для иммобилизации загрязняющих веществ и предотвращения их миграции.

Загрязнение почвы нефтешламами является серьезной экологической проблемой с потенциально серьезными экологическими последствиями и последствиями для здоровья.

Своевременные меры по восстановлению, профилактике и ответственному обращению с отходами являются ключом к смягчению воздействия этого загрязнения и защите как окружающей среды, так и здоровья человека [3].

Цель и задачи исследования

Количество отходов нефтеперерабатывающей промышленности увеличивается с каждым годом. Вредное воздействие шламовых отходов, содержащих токсичные компоненты, представляет угрозу для здоровья человека. В связи с этим основной целью поставленной в статье задачи было математическое и численное моделирование процесса термической переработки нефтешламов с целью снижения экологического ущерба.

Представлен подробный анализ методов и технологий переработки нефтешламов, на основании которого был выбран термический способ переработки нефтешламов с целью минимизации воздействия отходов на окружающую среду[4]. Доступные исследования по термической переработке нефтешламов ограничиваются одномерными моделями, представленными в статьях [5, 12]. Для термической переработки нефтешлама построена математическая модель, описывающая тепло- и массоперенос при испарении вредных веществ из резервуара нефтешлама, и решается классическим методом переменных направлений (ADI), упомянутым в работе [6] – один из наиболее успешных методов конечных разностей для решения параболических уравнений. Проведено численное решение дифференциальных уравнений и обширный вычислительный эксперимент, которые правильно описывают закономерности теплообмена и испарения вредных веществ при термической обработке нефтешламов.

Материалы и методы

А. Математическое и численное моделирование

Нефтешламы представляют собой серьезную проблему из-за их неоднородного состава и потенциальной опасности для окружающей среды. Традиционные методы утилизации, такие как захоронение или сжигание, не только дорогостоящие, но также могут привести к загрязнению почвы и грунтовых вод. Поэтому существует растущая потребность в устойчивых и эффективных методах лечения. Термическая обработка является приемлемым вариантом переработки нефтешламов. Этот метод предполагает нагревание шламов до высоких температур, что приводит к отделению углеводородов от воды и твердых веществ. Извлеченные углеводороды могут быть дополнительно переработаны для повторного использования или безопасной утилизации, а оставшиеся отходы будут преобразованы в более управляемую форму.

Численное моделирование играет решающую роль в понимании и оптимизации процесса термической обработки нефтешламов. Вот некоторые ключевые аспекты его важности:

- Понимание процесса. Численные модели помогают нам получить глубокое понимание физических и химических процессов, связанных с термической обработкой. Эти модели позволяют моделировать поведение нефтешламов в различных условиях и прогнозировать, как температура, давление и другие факторы влияют на разделение компонентов.

- Оптимизация. Моделирование позволяет инженерам и исследователям оптимизировать процесс очистки. Изменяя такие параметры, как температурные профили, время пребывания и методы нагрева, они могут найти наиболее эффективные условия для извлечения углеводородов, минимизируя при этом потребление энергии и воздействие на окружающую среду.

- Оценка безопасности. Численное моделирование также помогает оценить аспекты безопасности термической обработки. Моделирование выбросов летучих соединений и потенциальных опасностей позволяет принять меры безопасности для защиты работников и окружающей среды.

- Извлечение ресурсов: моделирование помогает количественно оценить извлекаемые ресурсы нефтешламов. Это помогает оценить количество ценных углеводородов, которые можно добыть, что способствует экономической рентабельности.

- Оценка воздействия на окружающую среду: Численные модели помогают оценить воздействие термической обработки на окружающую среду, помогая обеспечить соблюдение правил и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду.

Численное моделирование играет ключевую роль в термической обработке нефтешламов, предлагая понимание процессов и помогая в оптимизации, оценке безопасности, восстановлении ресурсов и оценке воздействия на окружающую среду. Поскольку нефтяная промышленность ищет более устойчивые и эффективные способы управления своими отходами, численное моделирование будет продолжать оставаться ценным инструментом в развитии науки и технологий переработки нефтешламов. Благодаря междисциплинарному сотрудничеству и постоянным исследованиям мы можем усовершенствовать эти модели, чтобы улучшить очистку нефтешламов и внести вклад в более чистое и устойчивое будущее.

Постановка задачи

Термический метод переработки нефтешламов был выбран с целью минимизации воздействия отходов на окружающую среду. Проведено моделирование термической переработки нефтешламов. Схема процесса представлена на рисунке 1. Предполагается, что нагревающий горячий конвективный поток воздуха проходит по поверхности листа снизу, а остальные стороны изолируются. С увеличением времени тепло распространяется по всему объему нефтешлама внутрь, а жидкие фракции нефтешлама испаряются наружу.

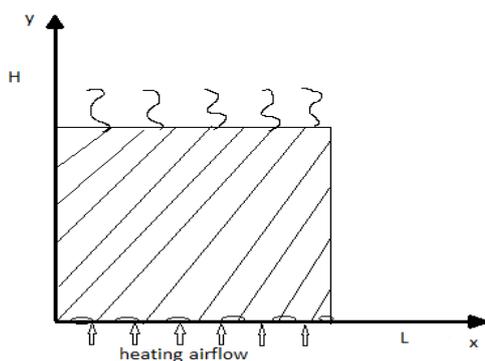


Рисунок 1. Схема термической переработки нефтешлама

По данным математического и численного моделирования термической обработки исследованы и проанализированы соответствующие характеристики процессов теплообмена при термической обработке нефтешламов.

Математическая модель термической переработки нефтешламов

Математическая модель процесса описывается системой уравнений теплопереноса и включает систему параболических дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных, содержащих нестационарные, конвективные и диффузионные тепло и концентрации. Перенос при термообработке, положенный в основу модели, взят из работы [7]. [8] разработанное нами математическое моделирование задачи нестационарного теплопереноса термообработки нефтешламов, включающее систему дифференциальных одномерных уравнений в безразмерных переменных. Уравнение теплопереноса описывает процесс теплопередачи при нагреве пластины нефтешлама потоком горячего воздуха.

Уравнение массопереноса описывает потери жидкой фракции при термической обработке нефтешлама:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial \bar{t}} + \bar{U} \frac{\partial \theta}{\partial \bar{x}} + \bar{V} \frac{\partial \theta}{\partial \bar{y}} = \frac{1}{(Re * Pr)} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial \bar{y}^2} \right) \\ \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{t}} + \bar{U} \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{x}} + \bar{V} \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{y}} = \frac{1}{(Re * Sc)} \left(\frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial \bar{y}^2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

Начальные и граничные условия теплопереноса:

$$\begin{aligned} \theta|_{\bar{t}=0} &= 0 \\ \frac{\partial \theta}{\partial \bar{x}}|_{\bar{x}=0} &= 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial \bar{x}}|_{\bar{x}=1} = 0 \\ \frac{\partial \theta}{\partial \bar{y}}|_{\bar{y}=0} &= -Bi(1-\theta_w), \quad \frac{\partial \theta}{\partial \bar{y}}|_{\bar{y}=1} = 0 \end{aligned}$$

Начальные и граничные условия массопереноса:

$$\begin{aligned} \bar{c}|_{\bar{t}=0} &= 0 \\ \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{x}}|_{\bar{x}=0} &= 0, \quad \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{x}}|_{\bar{x}=1} = 0 \\ \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{y}}|_{\bar{y}=0} &= -Bi(1-C_w), \quad \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{y}}|_{\bar{y}=1} = 0 \end{aligned}$$

θ – безразмерная температура, $\theta = \frac{T-T_0}{T_f-T_0}$, где T - текущая температура ($^{\circ}C$), T_f - начальная температура воздушного потока ($^{\circ}C$).

\bar{c} – безразмерная функция массы, $\bar{c} = (1 - C/\epsilon C_0)$, где C - концентрация паров жидкости, C_0 - начальная концентрация жидкости, ϵ - начальная испаряемая доля жидкостей нефтешлама, соответствующая температуре нагревательного потока.

\bar{x} , \bar{y} – безразмерные координаты, где $\bar{x} = x/L$, $\bar{y} = y/H$, x , y - координаты (м), L , H – размеры пластины нефтешлама, $H=L$

\bar{t} – безразмерное время, где $\bar{t} = t / L / u_f$,

\bar{u} - безразмерная составляющая скорости вдоль оси Ox , where $\bar{u} = u / u_f$, u – составляющая скорости вдоль оси Ox (принятая пока на данном этапе моделирования как постоянная), u_0 – начальная скорость (м/с).

\bar{v} - безразмерная составляющая скорости вдоль оси Oy , where $\bar{v} = v / u_f$, v – компонента скорости по оси OY (принят пока на данном этапе моделирования как константа),

m - пористость нефтешлама

Re - число Рейнольдса, где $Re = (u_f * L) / \eta$, η - кинематическая вязкость

Pr - число Прандтля, $Pr = \eta/a$, a - коэффициент температуропроводности

Sc - число Шмидта, $Sc = \eta/D$, D - коэффициент диффузии

Bi – число био

Для численных дифференциальных уравнений в системе (1) был использован метод переменных направлений. Проверены условия применимости и сходимости метода ADI [9-11] для нашей задачи. Решение выполняется с использованием неявной разностной схемы путем чередования направлений до тех пор, пока не будет выполнено условие сходимости.

Для изучения и прогнозирования влияния различных технологических параметров на переработку нефтешлама мы разработали специализированный программный комплекс. Полученные результаты расчетов обрабатываются с помощью инструментов Python. Встроенный инструмент типа Python был использован для интеграции с визуализацией результатов переработки отходов нефтешлама.

Результаты

Нефтешлам подвергался воздействию нагретого воздушного потока, и было проведено изучение основных закономерностей процессов тепло- и массообмена при термической обработке нефтешлама. Анализ процессов тепло- и массообмена позволяет установить, что температура и скорость конвективного потока, а также геометрические размеры пластины относятся к числу основных параметров, существенно влияющих на процесс термической переработки нефтешлама. В наших численных расчетах изменение температуры воздуха составило берется в диапазоне от 150°C до 450°C, а скорость подачи воздуха - в диапазоне от 0,83 м/с до 2,7 м/с. В результате математического и численного моделирования описанных выше процессов тепло- и массообмена при термической обработке нефтешлама с широким изменением значений скорости, начальной температуры и геометрических размеров были получены результаты. Были построены изменения температуры и концентрации. На рисунках 2 и 3 показаны изменения температуры нефтешлама при изменении технологических параметров со скоростью 0,83 м/с и 2,7 м/с при температуре 250°C соответственно. В случае конвективного нагрева более быстро движущаяся жидкость, очевидно, улучшает характеристики теплопередачи в системе, что, следовательно, усиливает процессы испарения и диффузии внутри нагретой масляной пластины. Кроме того, жидкости с более высокой скоростью на нагретой поверхности плиты увлекают за собой больше паров благодаря их более высокой скорости вращения. Это привело к относительно более высоким скоростям улетучивания, получаемым при более высоких скоростях потока, которые количественно показаны на рисунке 4. Расчеты проводились для сравнения с экспериментальными данными других авторов [12] при различных температурах и скоростях. Ожидается, что конечные пределы потери массы не будут зависеть от скорости потока, поскольку эти пределы контролируются исключительно максимальными температурами, в конечном счете достигаемыми в системе.

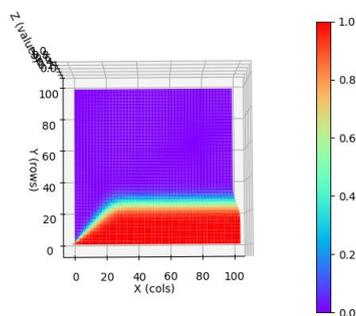


Рисунок 2. Изменения температуры нефтешлама при температуре 250°C со скоростью 0,83 м/с

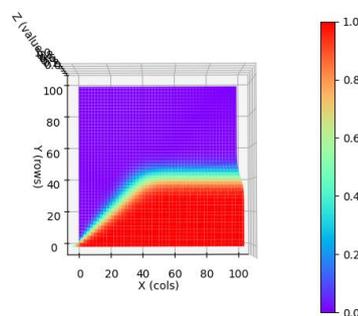


Рисунок 3. Изменения температуры нефтешлама при температуре 250°C со скоростью 2,7 м/с

Однако небольшой эффект, заметный на двух графиках, может быть, по крайней мере частично, обусловлен улучшенными условиями теплопередачи, связанными с более высокими скоростями потока, что могло привести к несколько более высоким температурам внутри нагретых плит из-за ожидаемого образования более тонких пограничных слоев на поверхности плит. Таким образом, именно небольшая разница температур приводит к незначительному изменению конечного предела испарения. Учитывая приведенное выше простое обсуждение, вывод, который можно было бы сделать здесь, заключается в том, что температура потока оказывает наиболее существенное влияние как на скорость переноса вещества во времени, так и на конечный предел улетучивания. На рисунке 4 показаны истории потери массы, помещенных в потоки горячего воздуха при различных температурах [13]. Как можно видеть, более высокие температуры потока повышают предельные пределы улетучивания и увеличивают скорость массообмена.

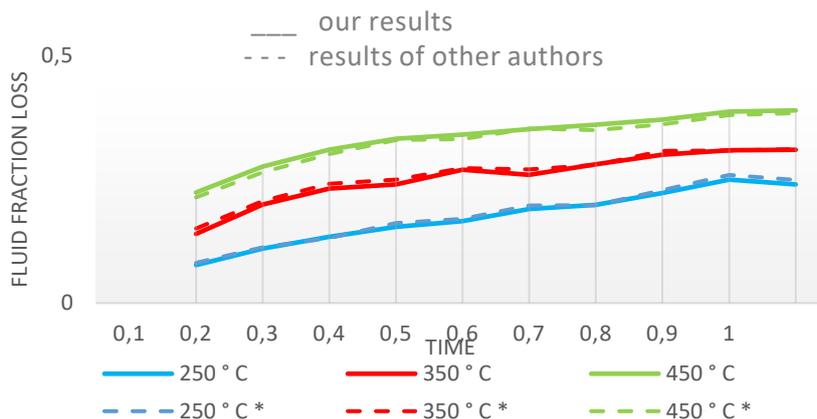


Рисунок 4. Сравнительный анализ потерь фракции жидкости в зависимости от времени при различной температуре потока со скоростью 0,83 м/с.

Этого следовало ожидать, и это можно объяснить тем фактом, что жидкости для смазки пластин являются многокомпонентными, которые испаряются при различных уровнях температур. Следовательно, чем выше температура потока, тем больше будет выпаренной фракции. То есть, при более высоких температурах потока верхний предел температуры, преобладающей внутри масляной пластины, будет больше, что приводит к испарению и диффузии более тяжелых компонентов. С другой стороны, диффузионная способность паров жидкости была бы выше при более высоких температурах, что ускоряет процесс диффузии жидкости. В результате численных экспериментов был получен эффект от скорости потока. Следовательно, было проверено влияние скорости потока на процесс массообмена. В процессе конвективного нагрева более быстро движущаяся жидкость, по-видимому, улучшает характеристики теплопередачи в системе, что, следовательно, усиливает испарение нефтешлама. Было проведено несколько экспериментов; в частности, результаты были получены при температурах 150°C, 250°C и 450°C и при скоростях 0,83 м/с, 1,6 м/с и 2,7 м/с. Было отмечено, что более высокие температуры потока повышают предельные пределы улетучивания и увеличивают скорость массообмена. Повышение температуры приведет к увеличению экономических затрат. В расчетах используется максимальное значение 450°C для проверки результатов в сравнении с экспериментальными данными авторов [12]. Анализ результатов численного расчета показывает, что построенная математическая модель [14] и численное решение задачи правильно описывают исследуемый термический способ переработки нефтешлама, и все вредные компоненты испарились для нейтрализации нефтешлама.

Заключение

В нашем двумерном математическом и численном моделировании мы рассчитали процессы тепло- и массообмена при термической обработке нефтешлама. Разработанные математическая и численная модели термообработки нефтешламов позволили получить основные характеристики протекающих процессов тепло- и массообмена при термической переработке нефтешламов. Для изучения процессов тепло- и массопереноса при переработке на основе численного моделирования был проведен ряд численных расчетов с широким варьированием параметров потока. В частности, результаты были получены при температурах 150°C, 250°C и 450°C, а также при скоростях 0,83 м/с, 1,6 м/с и 2,7 м/с. Было отмечено, что более высокие температуры потока увеличивают пределы испарения и в большей степени увеличивают скорость массопереноса. Более высокие температуры потока улучшают диффузию и конвекцию паров в нагревательные потоки, что, в свою очередь, увеличивает и ускоряет скорость испарения.

Было проведено множество расчетов для сравнения с экспериментальными данными других авторов, для проверки наших результатов, которые подтверждают, что представленные численные данные полученные результаты корректно описывают физические закономерности термической обработки нефтешлама, и, таким образом, математическая модель и разработанное численное моделирование позволяют нам эффективно изучать процессы тепло- и массообмена при термической обработке нефтешлама. Проведенные исследования по математическому и численному моделированию, результаты численных расчетов показывают, что термическая обработка нефтешлама способствует испарению вредных компонентов из нефтешлама.

Кроме того, проведенное математическое и численное моделирование термической переработки нефтешлама в будущем позволит оптимизировать технологические процессы, а полученные результаты могут быть использованы для практических целей в нефтегазовой промышленности. Таким образом, основная цель поставленной задачи была достигнута. Новизна работы заключается в математическом и численном моделировании двумерной задачи, изменяющейся во времени, и получении полной картины процесса термообработки нефтешлама. Эти результаты полезны для промышленности, чтобы уменьшить вред, наносимый окружающей среде. Было разработано программное обеспечение, позволяющее визуализировать данные расчетов с использованием инструментов, предоставляемых документацией Python [15,16]. Количество отходов нефтеперерабатывающей промышленности растет с каждым годом. Вредное воздействие шламовых отходов, содержащих токсичные компоненты, представляет угрозу для здоровья человека. Переработка нефтешламов для Казахстана, выбросы которого составляют около двух процентов от всех выбросов, занимающего 11-е место в мире с объемом в 30 миллиардов баррелей в рейтинге стран по запасам нефти, остается актуальной. В будущем мы планируем продолжить наши исследования по термической обработке нефтешлама с переменной скоростью, провести исследования по оптимизации процесса термической обработки нефтешлама.

Список использованных источников:

1. Утелбаев Б.Т., Джусипбеков У.Ж., Ошақбаев М.Т. Нефтешламы АО «Озенмунайгаз». *Международном научном журнале: Наука и мир*, 2018, № 3(55), С. 17-23.
2. N. Jadidi, B. Roozbehani, A. Saadat. *The Most Recent Researches in Oily Sludge Remediation Process, American Journal of Oil and Chemical Technologies*, 2(10), 340-348, 2019.
3. Балакаева Г.Т., Калменова Г.Б. Мұнай қалдықтарын өңдеудің моделін жасау. *Вестник КазННТУ, Физико-математические науки*, 2019, №3, стр 552-555.
4. Г.Т. Балакаева, Е. Микебаев, М. Сафонов, Е.К. Онгарбаев, С.Ж. Тетенов. Численное моделирование тепломассопереноса в реакторе непрерывного движения окисления нефтешламов, *Химический вестник Казахского национального университета*, 3, стр. 47-55, 2000
5. Shie, J., Lin, J., Chang, C. et al. (2004) 'Oxidative thermal treatment of oil sludge at low heating rates', *Energy & Fuels*, pp.1272–1281, DOI: 10.1021/ef0301811
6. Ismail, A. and Allan, M.M. (2004) 'A designed ADI software for solving Poisson's equation', *Mathematical & Computational Applications*, Vol. 9, No. 2, pp.157–164.
7. Anderson, Tannehill, and Pletcher, (1977) *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*. – 2nd ed., Taylor & Francis, 1977. ISBN 1-56032-046-X
8. G.Balakayeva, G.Kalmenova, C. Phillips. *Numerical modelling of the process of thermal treatment of oil slime, Int. J. Oil, Gas and Coal Technology*, Vol. 34, No. 2, 2023
9. Chang, M. J., Chow, L. C., Chang, W. S. *Improved alternating-direction implicit method for solving transient three-dimensional heat diffusion problems, Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 19 (1):P. 69–84.
10. Shan Zhao, A Matched. *Alternating Direction Implicit (ADI) Method for Solving the Heat Equation with Interfaces, Journal of Scientific Computing*, Volume 63-Issue 1 -pp 118–137, April,2015.

11. Ashaju, A. and Samson, B. Alternating-direction implicit finite-difference method for transient 2D heat transfer in a metal bar using finite difference method, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, June, Vol. 6, No. 6, pp.105–108, 2015.
12. Abdrabboh, M.A. (1983) *Studies in Heat and Mass Transfer in Oil Sand Beds*, Thesis, University of Calgary, Canada
13. Балакаева Г.Т., Калменова Г.Б. Мұнай шламын термиялық өңдеуге арналған қосымшаны әзірлеу, *Вестник КазНПУ им. Абая, серия «Физико-математические науки»*, No1(81), 2023г.
14. Balakayeva, G., Kalmenova, G. and Darkenbayev, D. Development of an application for the thermal processing of oil slime in the industrial oil and gas sector, *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, Vol. 2, pp.25–28, 2023.
15. Python interface to Tcl/Tk // Python Documentation [URL:https://docs.python.org/3/library/tkinter.html](https://docs.python.org/3/library/tkinter.html) 28.08.2019
16. A foreign function library for Python// Python Documentation [URL:https://docs.python.org/2/library/ctypes.html](https://docs.python.org/2/library/ctypes.html) 19.10.2022

References:

1. Utelbaev B.T., Dzhusipbekov U.Zh, Oshakbaev M.T. (2018) *Nefteshlamy AO «Ozenmunajgaz»*. [Oil sludge of Ozenmunaigas JSC] *Mezhdunarodnom nauchnom zhurnale: Nauka i mir*, № 3(55), 17-23. (in Russian)
2. N. Jadidi, B. Roozbehani, A. Saadat. The Most Recent Researches in Oily Sludge Remediation Process, *American Journal of Oil and Chemical Technologies*, 2(10), 340-348, 2019.
3. G.B. Kalmenova, G.T. Balakayeva, (2019) *Munai kaldyktaryn ondeudin modelin zhasau* [Developing a model of oil slime processing]. *Bulletin of KazNTU. Series Physics and mathematics*. №3, 552-555. (In Kazakh)
4. G.T. Balakayeva, E. Mikebaev, M. Safonov, E.K. Ongarbaev, S.Zh. Tetenov, (2000) *Chislennoe modelirovanie teplomassoperenosy v reaktore nepreryvnogo dvizheniya okisleniya nefteshlamov* [Numerical modeling of heat and mass transfer in a reactor for continuous movement of oxidation of oil slime]. *Chemical Bulletin of Kazakh National University*, 3, 47-55, (in Russian)
5. Shie, J., Lin, J., Chang, C. et al. (2004) 'Oxidative thermal treatment of oil sludge at low heating rates', *Energy & Fuels*, pp.1272–1281, DOI: 10.1021/ef0301811
6. Ismail, A. and Allan, M.M. (2004) 'A designed ADI software for solving Poisson's equation', *Mathematical & Computational Applications*, Vol. 9, No. 2, pp.157–164.
7. Anderson, Tannehill, and Pletcher, (1977) *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*. – 2nd ed., Taylor & Francis, 1977. ISBN 1-56032-046-X
8. G.Balakayeva, G.Kalmenova, C. Phillips. Numerical modelling of the process of thermal treatment of oil slime, *Int. J. Oil, Gas and Coal Technology*, Vol. 34, No. 2, 2023
9. Chang, M. J., Chow, L. C., Chang, W. S. Improved alternating-direction implicit method for solving transient three-dimensional heat diffusion problems, *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 19 (1): P. 69–84.
10. Shan Zhao, A Matched. Alternating Direction Implicit (ADI) Method for Solving the Heat Equation with Interfaces, *Journal of Scientific Computing*, Volume 63-Issue 1 -pp 118–137, April,2015.
11. Ashaju, A. and Samson, B. Alternating-direction implicit finite-difference method for transient 2D heat transfer in a metal bar using finite difference method, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, June, Vol. 6, No. 6, pp.105–108, 2015.
12. Abdrabboh, M.A. (1983) *Studies in Heat and Mass Transfer in Oil Sand Beds*, Thesis, University of Calgary, Canada
13. Balakayeva, G., Kalmenova, G. (2023) *Mұнай шламын термиялық өңдеуге арналған қосымшаны әзірлеу* [Development of an application for the thermal treatment of oil slime]. *bulletin KazNPU, series "Physical and Mathematical Sciences"*, No1(81). (in Russian)
14. Balakayeva, G., Kalmenova, G. and Darkenbayev, D. Development of an application for the thermal processing of oil slime in the industrial oil and gas sector, *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, Vol. 2, pp.25–28, 2023.
15. Python interface to Tcl/Tk // Python Documentation [URL:https://docs.python.org/3/library/tkinter.html](https://docs.python.org/3/library/tkinter.html) 28.08.2019
16. A foreign function library for Python// Python Documentation [URL:https://docs.python.org/2/library/ctypes.html](https://docs.python.org/2/library/ctypes.html) 19.10.2022