

УДК 532.5:66.067.3:519.6

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ МНОГОФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ В КОМБИНИРОВАННОМ ФЛОТАЦИОННОМ АППАРАТЕ

Сергианский Е.В. ORCID ID 0000-0003-2404-6241

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Мурманский арктический университет», Апатиты, Российская Федерация,
e-mail: sls_sls30@rambler.ru*

Статья посвящена разработке модели вычислительной гидродинамики многофазного течения в комбинированном флотационном аппарате для очистки сточных вод. Целью исследования являлось создание достоверной расчетной модели, пригодной для анализа и оптимизации гидродинамических режимов данного оборудования. В работе рассмотрены системы автоматизированного проектирования (SolidWorks, Autodesk Fusion 360, Компас-3D, AutoCAD, Gambit) для подготовки геометрии и генерации расчетной сетки. Для реализации гидродинамических расчетов в ANSYS Fluent определен Gambit, как самый универсальный инструмент для задания условий однозначности модели. Представлена методика построения параметрической трехмерной модели рабочей зоны флотатора с детализированным описанием этапов предпроцессорной подготовки: создания гибридной тетраэдralной сетки с адаптацией в зонах интенсивного перемешивания, а также задания граничных и начальных условий. Для моделирования многофазного потока использован эйлеров подход, где вода является основной фазой, а воздух – вторичной. Турублентность описана с помощью стандартной модели $k - \varepsilon$. Результатом исследования является готовая к проведению вычислительных экспериментов модель, которая позволяет изучать распределение скоростей, концентраций фаз и градиентов давления в аппарате. Разработанная модель служит основой для последующего анализа и интенсификации процесса флотационной очистки.

Ключевые слова: комбинированный флотационный аппарат, Gambit, граничные условия, геометрия, генерация сетки, CFD-модель, ANSYS Fluent

DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODEL OF A MULTIPHASE FLOW IN A COMBINED FLOTATION APPARATUS

Sergiyanskiy E.V. ORCID ID 0000-0003-2404-6241

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“Murmansk Arctic University”, Apatity, Russian Federation,
e-mail: sls_sls30@rambler.ru*

The article is devoted to the development of a computational fluid dynamics model for multiphase flow in a combined flotation device for wastewater treatment. The aim of the study was to create a reliable computational model suitable for analyzing and optimizing the hydrodynamic modes of this equipment. The paper considers computer-aided design systems (SolidWorks, Autodesk Fusion 360, Compass-3D, AutoCAD, Gambit) for geometry preparation and computational grid generation. To implement hydrodynamic calculations in ANSYS Fluent, Gambit is defined as the most versatile tool for setting the conditions for unambiguity of the model. A technique is presented for constructing a mixing, as well as setting boundary and initial conditions. The Eulerian approach is used to model a multiphase flow, where water is the main phase and air is the secondary phase. Turbulence is described using the standard $k - \varepsilon$ model. The result of the study is a model ready for computational experiments, which allows us to study the distribution of velocities, phase concentrations, and pressure gradients in the apparatus. The developed model serves as the basis for the subsequent analysis and intensification of the flotation purification process.

Keywords: combined flotation device, Gambit, boundary conditions, geometry, grid generation, CFD-model, ANSYS Fluent

Введение

Математическое моделирование интенсивно совершенствуется и успешно внедряется в разнообразные сферы деятельности – от проектирования технических устройств до исследования сложных социально-экономических процессов [1]. Интенсификация процесса очистки промышленных сточных вод также может реализовываться посредством применения современных программ, предназначенных для компьютерного моделирования [2; 3]. Благодаря применению

таких инструментов стало возможным анализировать работу таких аппаратов, усовершенствовать режимы их работы.

Постановка задачи математического моделирования подразумевает четкую последовательность шагов, предложенную, например, А.А. Самарским [4, с. 7]. Для реализации более точного и реалистичного моделирования необходимо правильно подобрать программную среду, в которой будет осуществляться построение геометрии исследуемого аппарата, задание граничных условий, а также генерироваться сеточная модель.

Цель исследования – провести сравнительный анализ специализированных программных инструментов, используемых для разработки трехмерных моделей, совместимых с системами автоматизированного инженерного анализа и вычислений, что потребовало создать рабочую расчетную модель, подходящую для последующего использования в комплексных инженерных исследованиях.

Материалы и методы исследования

Один из способов интенсификации очистки сточных вод – использование комбинированных флотационных аппаратов, предложенных Б.С. Ксенофонтовым [5, с. 49–76; 6; 7]. Сочетание различных методов флотации в одном устройстве позволяет получить высокую степень очистки воды от различных загрязняющих веществ. Принцип их работы отличается, но основан на использовании процесса флотации.

Для модернизации различных конструкций флотатора комбинированного действия посредством компьютерного моделирования в первую очередь необходимо проанализировать различные программные инструменты, которые позволяют достаточно точно воспроизвести гидродинамику в флокомбайне, как один из основных критериев успешного протекания флотационной очистки.

Можно выделить три ключевые системы, необходимые для полноценного моделирования любых изделий и процессов на персональном компьютере:

1. CAD (Computer-Aided Design) – предназначено для конструирования двух- и трехмерных моделей продукции и составных частей изделия на компьютере.

2. CAM (Computer-Aided Manufacturing) – служит для формирования управляющих команд для станков и оборудования, автоматизирует производственные процессы на основе готовых 3D-моделей, полученных в CAD-среде.

3. CAE (Computer-Aided Engineering) – охватывает область анализа и симуляционного тестирования конструктивных и технологических аспектов. Включает расчеты прочности, теплового режима, гидравлических характеристик и другие виды инженерного анализа.

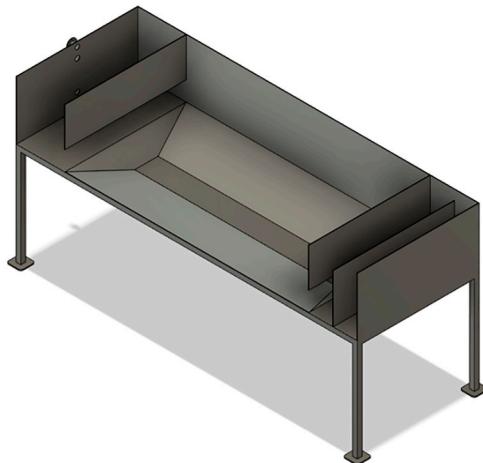
Для осуществления компьютерного моделирования был выбран ANSYS Fluent, как один из наиболее распространенных программных продуктов в области вычислительной гидродинамики [8; 9]. Реализация достоверных результатов также зависит от правильной настройки аппарата и в CAD-редакторе.

Были проанализированы основные инструменты для двух- и трехмерных моделей,

такие как SolidWorks, Autodesk Fusion 360, AutoCAD [10–12]. Также рассмотрена отечественная система автоматизированного проектирования Компас-3D [13] и Gambit, как программа, разработанная компанией Fluent Inc [14]. Вопрос о создании компьютерной геометрии рассматривался с точки зрения генерации расчетной сетки, задания граничных условий, а также интеграции в ANSYS Fluent.

Результаты исследования и их обсуждение

Для визуализации комбинированного флотационного аппарата в трехмерном формате используем Autodesk Fusion 360, как один из самых гибких и мощных инструментов для проектирования инженерных конструкций (рис. 1).



*Рис. 1. Визуализация исследуемого флотатора комбинированного действия
Примечание: составлен автором по результатам исследования*

Чтобы реализовать математическое моделирование процесса флотации, важно провести серию вычисленных экспериментов. Полученные данные позволят детально изучить поведение среды в аппарате, включая распределение скоростей водных потоков и водовоздушной смеси, распределение фазы воздуха и градиенты скоростей. Основная задача состоит в построении точной геометрической модели рабочей зоны устройства, необходимой для последующего анализа в программе ANSYS Fluent. Геометрия создается с использованием специализированного CAD редактора Gambit, позволяющего точно задать конфигурацию и детали проектируемого аппарата. Этот этап является ключевым для успешного проведения последующих расчетов и обеспечивает точность полученных результатов.

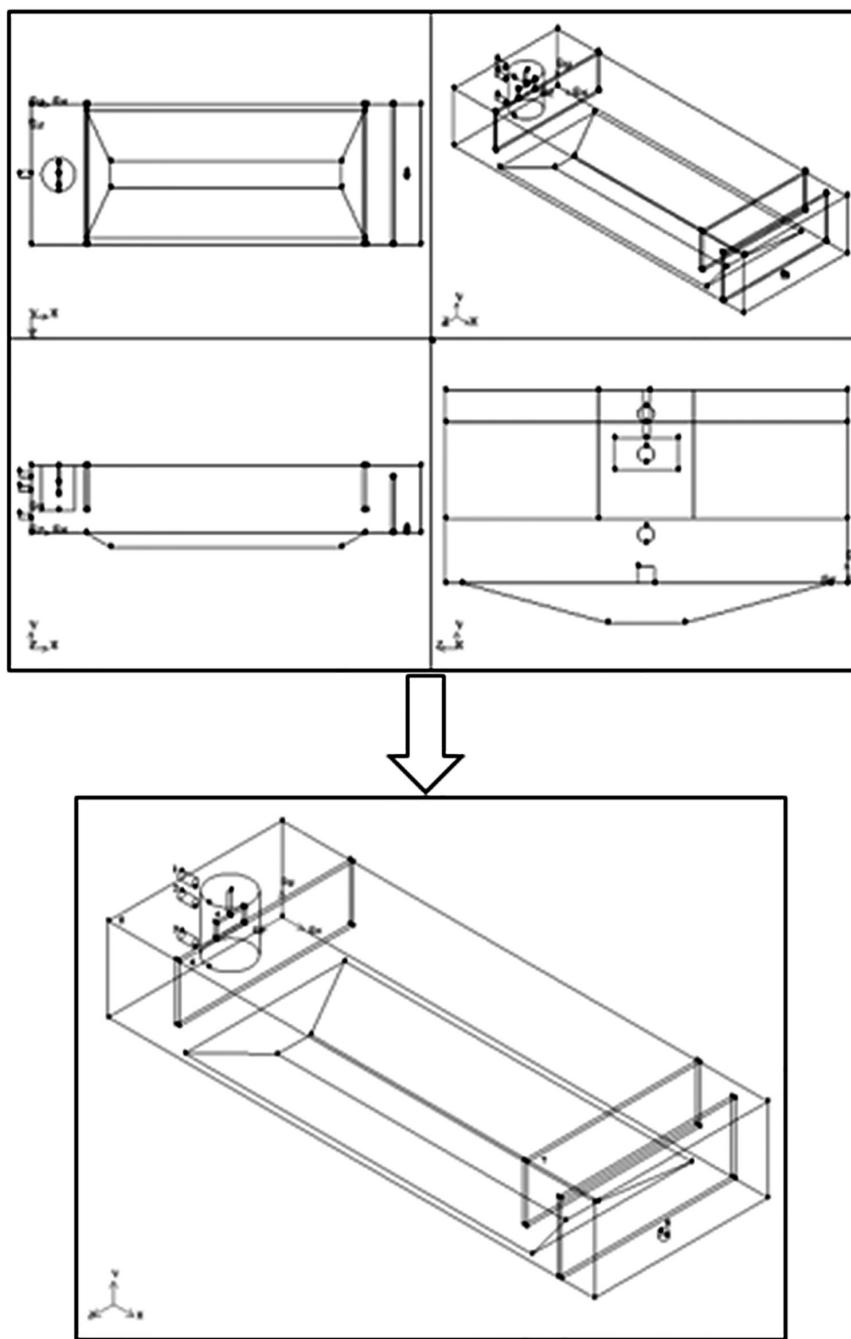


Рис. 2. Геометрия рабочей области исследуемой модели
Примечание: составлен автором по результатам исследования

Флотатор комбинированного типа оснащен рабочим объемом, представляющим собой специальную полость, заполненную водой в качестве основной среды.

Габариты разработанной модели составляют: ширина – 0,25 м, длина – 0,702 м, а высота колеблется от 0,12 до 0,145 м в разных участках конструкции (рис. 2).

Общая вместимость аппарата достигает 0,0222 м³.

Для того, чтобы обеспечить корректное численное решение в ANSYS Fluent, были заданы необходимые условия однозначности разработанной модели. В редакторе Gambit следующие граничные условия:

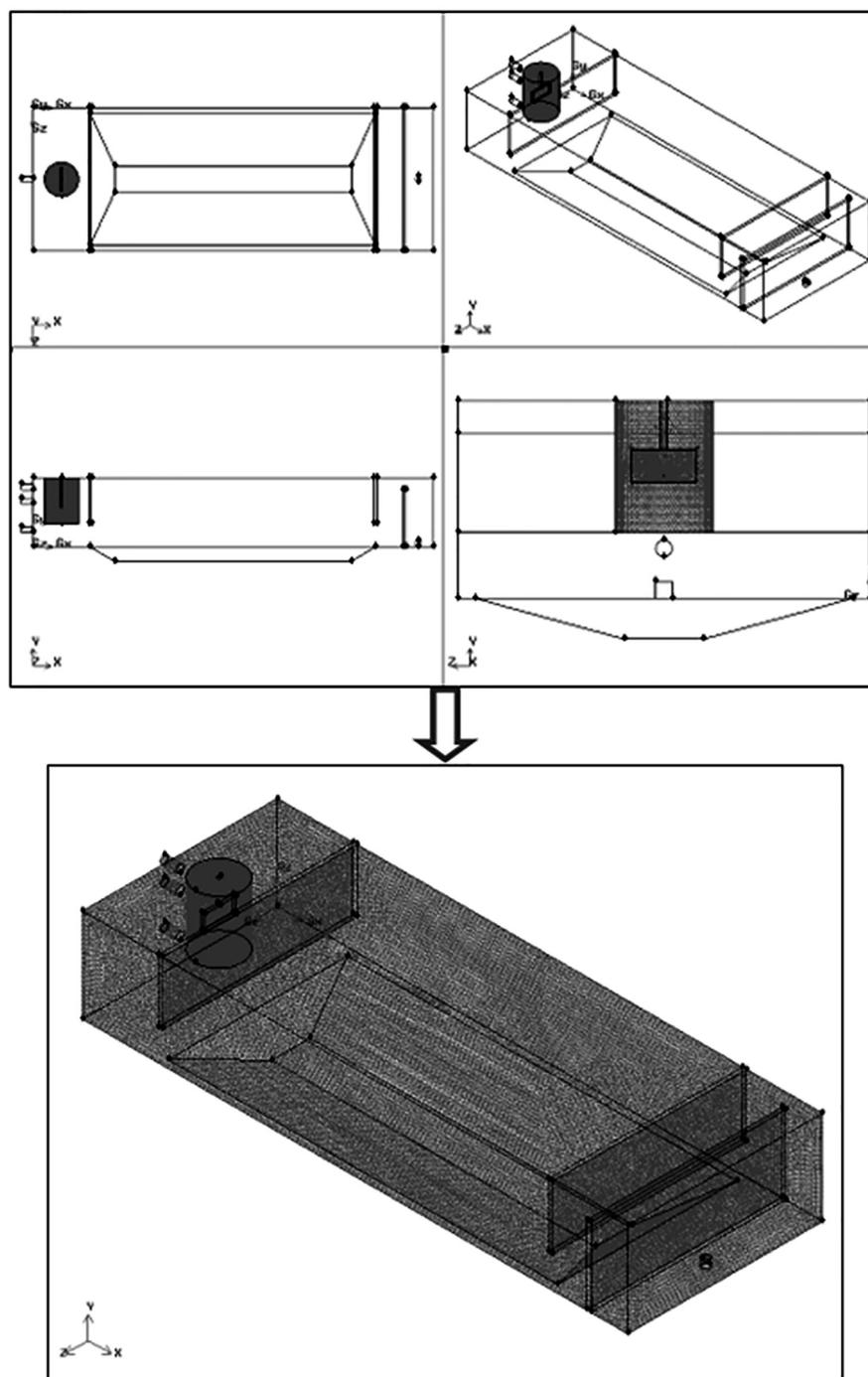
1. Вход давления (pressure inlet) и выход давления (pressure outlet) определяются перед началом вычислительного эксперимента либо могут быть скорректированы в процессе расчета.

2. Интерфейс (interface) связывает зону вращения перемешивающего устройства (представлено в виде прямоугольного элемента размерами 0,02 (высота) \times 0,04 (длина) \times 0,002 (ширина)) с основной моделью.

3. Стена (wall) ограничивает рабочую область, внутри которой определяются основные зависимости.

Основное объемное условие – флюид (fluid).

При разработке модели флотационного аппарата в CAD-программе была создана специальная расчетная сетка, состоящая из тетраэдralных элементов. Такая структура сетки обусловлена особенностями геометрии устройства и необходимостью обеспечить высокую точность вычислений.



*Рис. 3. Расчетная сетка исследуемой модели
Примечание: составлен автором по результатам исследования*

Особое внимание уделено зонам интенсивного перемешивания, где плотность сетки увеличена. Размер ячейки здесь составляет всего 0,002 м. Количество элементов в этой части модели достигло 185 508 штук. В остальных областях аппарата используются элементы большего размера – 0,0052 м. Их общая численность составила 939 954 единицы. Такой подход позволяет снизить нагрузку на вычислительную технику, сохраняя при этом достаточную степень точности моделирования даже в менее критичных зонах. Суммарное число тетраэдralных элементов всей расчетной сетки составило 1 125 462 элемента (рис. 3).

Для дальнейшей обработки в пакете CFD (computational fluid dynamics)-анализа ANSYS Fluent экспортируется в специальном формате MESH (*.msh), так как он оптимален для передачи сеточных данных между разными программами и поддерживает интеграцию с широким спектром моделей турбулентности, граничных условий и методов решения уравнений Навье – Стокса.

Процесс математического моделирования многофазного течения в рамках предложенной модели осуществляется посредством эйлеровского подхода [15]. Вода служит главной фазой, тогда как воздух играет роль второстепенного компонента. Поскольку воздушные пузырьки имеют незначительный размер (порядка 100 мкм), применима модель идеального газа, исключающая эффекты коалесценции. Объемная концентрация воздуха, поступающего через единственную точку входа, установлена равной 0,05 от общего расхода.

Учитывая небольшой диаметр впускных отверстий, высокие значения начальных скоростей, а также наличие специального перемешивающего устройства, выбрана классическая двухпараметрическая $k - \varepsilon$ модель турбулентности, соответствующая числу Рейнольдса, примерно равному 75 000. Начальные условия предполагают подачу давления в систему, соответственно абсолютное давление устанавливается на уровне 0,2–0,25 от нормального атмосферного. Скорость вращения мешалки принята равной 3 об./с (угловая скорость 18,84 рад/с). Ускорение свободного падения установлено по вертикальной оси Y и имеет значение 9,81 м/с². Расчеты проводятся пошагово, причем каждый временной интервал длительностью 0,01 с требует 20 итераций.

Данные параметры обеспечивают адекватное описание реальных гидродинамиче-

ских явлений, протекающих в комбинированном флотационном аппарате, и приближают виртуальную модель к характеристикам реального устройства.

Таким образом, разработанная компьютерная модель станет платформой для проведения вычислительных экспериментов в программном комплексе ANSYS Fluent. Результаты численного моделирования в дальнейшем необходимы как основа для усовершенствования флотатора комбинированного действия.

Заключение

Работа посвящена исследованию и созданию математической модели флотокомбайна, используемого для эффективной очистки сточных вод. Проведенное исследование позволило разработать эффективную модель комбинированного флотационного аппарата, которая должна воспроизводить гидродинамические режимы рабочего объема устройства. В исследовании определены программные продукты, необходимые для реализации инженерных расчетов. Определена оптимальная расчетная сетка, условия однозначности, обеспечивающие достоверность моделирования. Результат данного исследования стал основой для будущих научных работ и практических приложений в сфере охраны окружающей среды.

Список литературы

1. Александрова Е.В. Математическое моделирование как наука // Аграрный сектор экономики России: опыт, проблемы и перспективы развития: материалы всероссийской (национальной) научной конференции (г. Орел, 26 июня 2020 г.) / Науч. ред. Е.В. Бураева. Орел: Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина. 2020. С. 367–370. EDN: HOVFTC.
2. Дүйсебекова К.С., Дұзбаев Н.Т., Аманжолова С.Т. Формализация задачи экологического мониторинга и выбор модели // Вестник Казахстанско-Британского технического университета. 2019. Т. 16. № 3. С. 95–102. URL: <https://vestnik.kbtu.edu.kz/jour/article/view/258> (дата обращения: 22.12.2025).
3. Атаева Д.А. Численные методы как основа математического моделирования и вычислительных технологий // Наука и мировоззрение. 2025. Т. 1. № 64. С. 136–141. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennye-metody-kak-osnova-matematicheskogo-modelirovaniya-i-vychislitelnyh-tehnologiy/viewer> (дата обращения: 22.12.2025).
4. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М., 2002. 320 с. URL: http://lib.yusu.am/disciplines_bk/98915d7ec85c9361cf1f6339cf201de0.pdf (дата обращения: 20.12.2025). ISBN 978-5-9221-0120-2.
5. Ksenofontov B. Flotation Multistage and Generalized Models of the Process Harvesters of Ksenofontov Type and for Special Purpose. London: Academus Publishing, 2021. 299 p. DOI: 10.31519/0022-8. EDN: HBWWYN. ISBN 978-1-4946-0022-8.
6. Ксенофонтов Б.С. Очистка сточных вод: многостадийная модель флотации и флотокомбайны // Водоочистка. 2018. № 12. С. 5–21. EDN: VTMJTY.

7. Ксенофонтов Б.С., Козодаев А.С., Таранов Р.А., Виноградов М.С. Флотокомбайн для очистки сточных вод // Кадры инновационного развития. 2022. № 2. С. 49–57. DOI: 10.18698/jpcid.2022.2.49-57.
8. Сергианский Е.В. CFD-моделирование гидродинамики комбинированных флотационных аппаратов для очистки сточных вод // Нефть и газ: опыт и инновации. 2025. Т. 9. № 2. URL: <https://nigaz.ru/wp-content/uploads/2025/05/CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ-ГИДРОДИНАМИКИ-КОМБИНИРОВАННЫХ-ФЛОТАЦИОННЫХ-АППАРАТОВ-ДЛЯ-ОЧИСТКИ-СТОЧНЫХ-ВОД.pdf> (дата обращения: 04.01.2026).
9. Чернов А.А. Моделирование гидродинамики потока жидкости с абразивными частицами в технологическом трубопроводе с использованием ПК «ANSYS» // Аллея науки. 2018. Т. 4. № 5 (21). С. 109–113. EDN: USYUIK.
10. Зуев Е. Преимущества трехмерного моделирования в среде SOLIDWORKS // САПР и графика. 2020. № 3 (281). С. 60–61. EDN: WJGEEL.
11. Долова А.А., Константиниди А.Ю., Траоре Д.О. Основы 3D моделирования с применением САПР Autodesk Fusion 360 // Политехнический молодежный журнал. 2018. № 10 (27). С. 6. DOI: 10.18698/2541-8009-2018-10-389.
12. Свищев А.В., Хоркина А.А. Целесообразность применения AutoCAD для автоматизированного проектирования // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 46. С. 909–913. EDN: GCDOAP.
13. Ульянова Н.Д., Танаисогло Д.В. Обзор программных продуктов 3D-моделирования // Инновационное развитие предпринимательской деятельности региона: сборник статей международной научно-практической конференции (г. Брянск, 25 ноября 2021 г.). Брянск: Брянский институт управления и бизнеса, 2021. С. 37–43. EDN: PLJQQH.
14. Зиганшин А.М., Логачев А.А., Посохин В.Н. Валидация компьютерной модели течения в вытянутом и припомном симметричных вентиляционных тройниках // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. № 1 (55). С. 58–70. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/validatsiya-kompyuternoy-modeli-techeniya-v-vytyazhnom-i-pritochnom-simmetrichnyh-ventilyatsionnyh-troynikah/viewer> (дата обращения: 27.12.2025).
15. Рулева Н.Ю., Солбаков В.В. Экологическое моделирование и эйлеров подход, примеры расчетов // Исследование операций (модели, системы, решения). 2020. Т. 6. С. 70–82. DOI: 10.14357/ORMSS20200109. EDN: MFFHAK.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.