

УДК 628.2

DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-6-81-86

© Ч. Ли, магистр

© Z. Li, MSci

© Е. Л. Терехова, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

© E. L. Terekhova, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: liczi159@gmail.com, eterekhova@lan.spbgasu.ru

E-mail: liczi159@gmail.com, eterekhova@lan.spbgasu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА В АЭРОТЕНКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ANSYS FLUENT

INVESTIGATION OF AERATION TANK FLOW CHARACTERISTICS USING ANSYS FLUENT PROGRAM

Рассматривается проблема оседания ила в классических аэротенках-каруселях на очистных канализационных сооружениях. Для изучения влияния количества лопастей в пропеллерах на процесс движения активного ила применялась программа ANSYS Fluent. Создание модели предусматривало использование стандартной модели $k-\epsilon$ для описания турбулентности. Устройство пропеллеров предполагалось в трех точках аэротенка, на поворотах, которые в процессе моделирования функционируют одновременно. Целью исследования является изучение распределения скоростей в разных сечениях аэротенка и в общем потоке, для определения оптимального количества лопастей пропеллера для данной конструкции сооружения. Результаты показали, что двойной пропеллер обеспечивает более быстрое циркуляционное движение воды в аэротенке по сравнению с одинарным, что помогает уменьшить оседание ила. Также двойной пропеллер способствует более эффективному распределению скорости потока на дне аэротенка, что обеспечивает более эффективную работу, исключая замедление потока в нижней части сооружения.

Ключевые слова: аэротенк, лопасть, вычислительная гидродинамика, потоковое поле, пропеллер.

This study focuses on the problem of sludge settling in classic Carrousel type aeration tanks at sewage treatment plants. The ANSYS FLUENT program was used to study the effect of the number of blades in propellers on the movement of activated sludge. The creation of the model involved the use of a standard $k-\epsilon$ model to describe turbulence. The propellers were supposed to be set at three points of the aeration tank, at turns which function simultaneously during the simulation process. The aim of the investigation was to study the velocity distribution in different sections of the aeration tank, and in the general flow, in order to determine the optimal number of propeller blades for a given design of the structure. The results have shown that a double propeller provides faster circulation of water in the aeration tank compared to a single one, which helps to reduce sludge subsidence. Also, the double propeller contributes to a more efficient distribution of the flow velocity at the bottom of the aeration tank, which ensures more efficient operation, eliminating slowing down of the flow in the lower part of the structure.

Keywords: aeration tank, blade, computational fluid dynamics, flow field, propeller.

Введение

В карусельных аэротенках применяют специальные устройства для направленного перемешивания, которые создают горизонтальное перемешивание жидкости, обеспе-

чивая ее циркуляцию в замкнутом пространстве. В таких конструкциях аэротенков часто используют пропеллеры для циркуляции воды. Чтобы избежать накопления ила на дне, средняя скорость потока должна состав-

лять от 0,3 до 0,5 м/с и выше, а скорость на дне не должна опускаться ниже 0,15 м/с [1]. Наличие изгибов усложняет движение потока в аэротенке, делая распределение скорости неравномерным, затрудняя стабильную работу системы биологической очистки и препятствуя снижению энергопотребления.

Точное численное моделирование распределения скорости потока в аэротенке критически важно для оптимизации его конструкции. Основываясь на принципах моделирования CFD [2], опишем численное моделирование потоков в изгибах аэротенка на городской очистной станции (Цзясин, Китай) и на основе этого моделирования оптимизируем конфигурацию направляющих стенок при разных конструкциях пропеллеров. Анализируя конструкции пропеллеров с одной и двумя лопастями, определим оптимальную конфигурацию для улучшения распределения скорости потока, предотвращения накопления ила и снижения энергопотребления [3].

В данном исследовании на примере реального аэротенка на очистных сооружениях города Цзясин с помощью программы ANSYS Fluent смоделировано распределение скорости потока воды в аэротенке и проанализирована возможность накопления ила при существующей конструкции. При сохранении исходной конструкции изменение количества лопастей пропеллера позволит проанализировать характеристики скоростного поля и оценить влияние количества лопастей на скорость работы аэротенка.

1. Методы

1.1. Параметры модели

В этой работе мы моделируем карусельный аэротенк. Его высота составляет всего 45 мм, а длина приблизительно 435 мм. Канал разделен на четыре прохода шириной 84 мм каждый. В местах поворотов на верхней части установлены три лопастных пропеллера, которые находятся на высоте 10 мм от дна. В прямых участках расположены два

пропеллера, поднятых на 7,5 мм от дна. Внутри канала циркулирует вода. Размеры аэротенка представлены на рис. 1.

Пропеллеры в карусельном аэротенке создают направленное движение потока. Вращение лопастей пропеллера также создает вихри [4]. Эти вихри могут влиять на распределение потока рядом с пропеллерами, но, если сравнивать с общим потоком в канале, их воздействие минимально. Поэтому при моделировании можно пренебречь этим эффектом. Главная задача лопастей — передать энергию воде и обеспечить ей необходимую скорость вдоль оси канала.

Чтобы изучить скорость потока в аэротенке, мы анализируем его на разных глубинах. Для анализа взяты три уровня: нижний слой на глубине $Y = 10$ мм, средний слой на глубине $Y = 20$ мм и верхний слой на глубине $Y = 30$ мм. Распределение скоростей потока в этих сечениях представлено на рис. 2.

Рассмотрим, как количество лопастей в пропеллерах А, В и С на трех поворотах влияет на поток в аэротенке. Вариант двойного пропеллера представляет собой конструкцию из двух одинарных, соответственно, у него получается вдвое больше лопастей. У одинарных и двойных пропеллеров одинаковый радиус, и они установлены на одинаковом расстоянии от дна канала. Также они находятся на одном уровне относительно центральной перегородки. При одинаковой

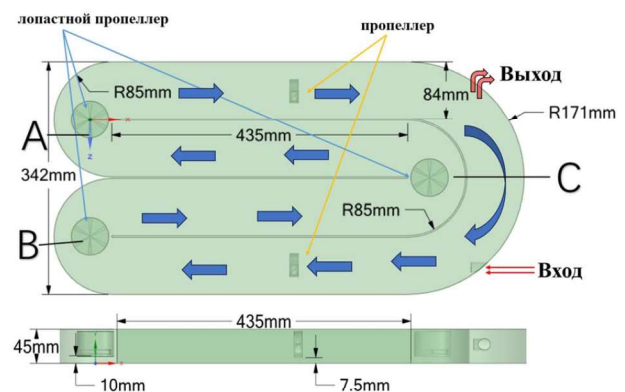


Рис. 1. Размеры модели аэротенка

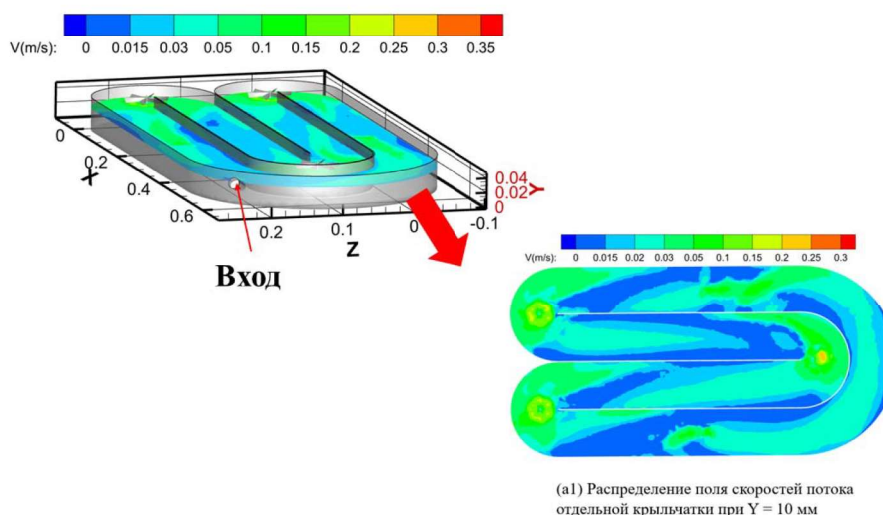


Рис. 2. Распределение скоростей потока в аэротенке в плане

скорости вращения пропеллеров анализируются характеристики потока в аэротенке. Подробное устройство лопастных пропеллеров в аэротенке показано на рис. 3.

1.2. Контрольные уравнения

Чтобы рассчитать условия потока, создаваемого мешалкой, в исследовании была применена однофазная трехмерная модель вычислительной гидродинамики. Предполагается, что вода в аэротенке течет равномерно, используется трехмерная модель k - ϵ турбулентного течения [4, 5]. Решение задачи осуществляется с помощью следующих уравнений:

Уравнение сохранения массы:

$$\frac{\partial u_i}{\partial \chi_i} = 0. \quad (1)$$

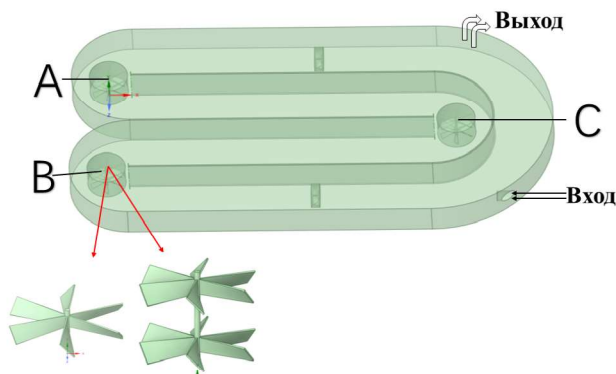


Рис. 3. Расположение пропеллерных мешалок в аэротенке

Уравнение движения:

$$\frac{\partial}{\partial \chi_j} u_i u_j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial \chi_i} + \frac{\partial}{\partial \chi_j} \left[\nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial \chi_j} + \frac{\partial u_j}{\partial \chi_i} \right) \right], \quad (2)$$

где $\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$.

Уравнение для турбулентной кинетической энергии k :

$$u_i \frac{\partial k}{\partial \chi_i} = \frac{\partial}{\partial \chi_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial \chi_i} \right) + G - \epsilon_i. \quad (3)$$

Уравнение для скорости диссипации турбулентности ϵ :

$$u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial \chi_i} = \frac{\partial}{\partial \chi_i} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial \chi_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (4)$$

где G — генерация турбулентной кинетической энергии,

$$G = \nu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial \chi_j} + \frac{\partial u_j}{\partial \chi_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial \chi_j}, \quad (5)$$

при этом $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ — числа Прандтля для k и ϵ соответственно; k — кинетическая энергия турбулентности; ϵ — скорость рассеяния; ν — турбулентная вязкость; $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$ — константы, $C_{1\epsilon} = 1,44$, $C_{2\epsilon} = 1,92$.

1.3. Расчетная схема

В качестве расчетной схемы приняты тетраэдрические сетки с размером ячейки 11 мм. В зоне контакта потока с твердой стенкой сооружения для моделирования погранич-

ного слоя выполнялось уменьшение сетки до размера 9,5 мм. Выбранная сетка позволила обеспечить требуемую точность и сходимость задачи в условиях проточной области со сложной геометрической формой. Всего в зоне около 500 тыс. ячеек с приблизительно 120 тыс. узлов. На рис. 4 представлена схема сетки [6].

1.4. Граничные условия и методы решения

Предположим, что поток воды в аэротенке является стационарным и скорость потока на входе установлена на уровне 0,001 м/с. Используется модель движения сетки (Mesh Motion) для описания относительного движения между пропеллерами и аэротенком. Предполагается, что скорость вращения лопастей пропеллеров А, В и С составляет 120 об/мин, а скорость вращения пропеллера в прямом участке трубы — 150 об/мин. Учитывая, что на поверхности пропеллера имеются равномерно расположенные клиновидные выступы, для имитации шероховатости стенок высота шероховатостей установлена на уровне 0,005 м. Модель должна учитывать поверхность воды (рис. 5), находящуюся под атмосферным давлением, поэтому воздух атмосферы будет соприкасаться с поверхностью воды, которая будет являть-

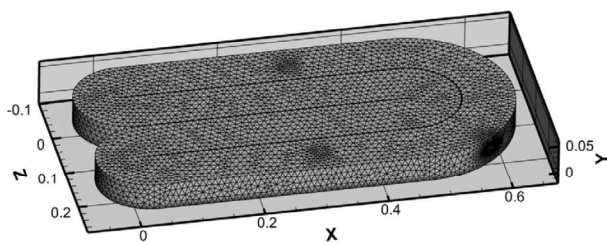


Рис. 4. Схематическое изображение сетки

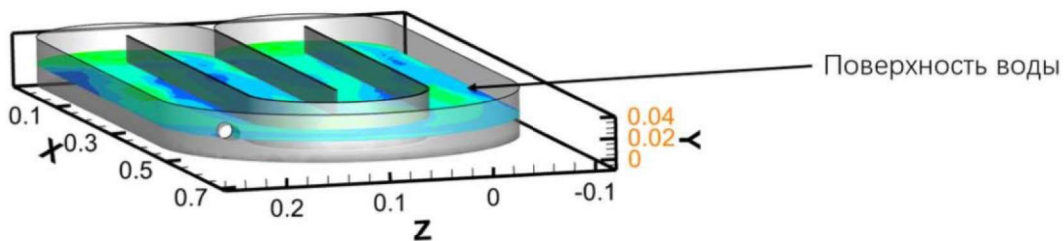


Рис. 5. Модель аэротенка, заполненного водой

ся выходом для растворенного в ней воздуха. Верхняя поверхность модели задана давлением атмосферного воздуха, вход в сооружение — скоростью входящего потока, стены и дно канала — как твердые поверхности. Для построения используется модель турбулентности RNG k - ϵ , а для связи давления и скорости используется алгоритм SIMPLEC (это опция, установленная ANSYS).

1.5. Определение поля скоростей потока в экспериментальной модели аэротенка

Так как нормативы требуют, чтобы скорость потока в реальном аэротенке была не менее 0,15–0,3 м/с, скорость потока в экспериментальной модели аэротенка определяется согласно принципу подобия по числам Фруда [5]. Скорость в модели и соответствующая скорость в оригинале связаны следующим соотношением: $v_M = v_p \frac{1}{\sqrt{\lambda_L}}$, при этом геометрический масштаб оригинала в 100 раз больше, чем у модели (то есть масштаб длины $\lambda_L=100$). Это означает, что скорость потока в экспериментальной модели аэротенка должна быть не менее 0,015–0,03 м/с.

2. Анализ и интерпретация результатов моделирования

На рис. 6 представлены графики распределения скорости потока, полученные после стабилизации вычислений (рис. 6, a1, b1, c1 — для одиночного пропеллера; рис. 6, a2, b2, c2 — для двойного). Верхние графики распределения скорости (рис. 6, a1 и a2) соответствуют высоте $Y = 10$ мм, средние (рис. 6, b1 и b2) — $Y = 20$ мм, нижние (рис. 6, c1 и c2) — $Y = 30$ мм. Сравнивая графики для одинар-

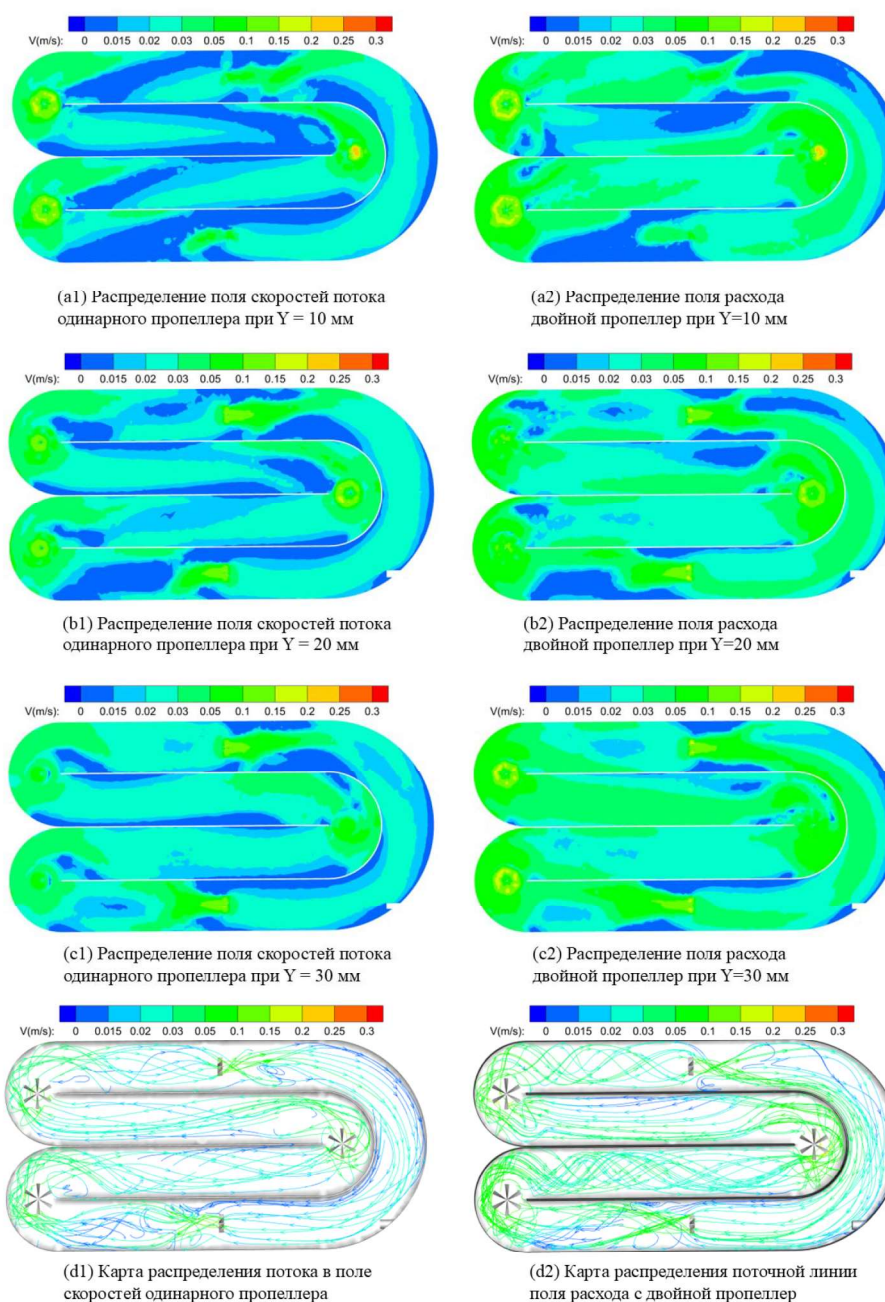


Рис. 6. Графики распределения скоростей потока в модели аэротенка

ного и для двойного пропеллера, видим, что у двойного пропеллера зоны со скоростью выше 0,015 м/с занимают большую площадь. Кроме того, двойной пропеллер обеспечивает более равномерное распределение скорости в зонах возврата A, B, C при поворотах. В нижней части аэротенка двойной пропеллер уменьшает размеры зон возврата в районах

A, B, C по сравнению с одинарным, ускоряя поток и сокращая вероятность оседания ила.

На рис. 6, d1, d2 показана карта распределения направления потока воды в модели аэротенка. Дальнейший анализ карты потоков (рис. 6, d1 для одинарного и рис. 6, d2 для двойного пропеллера) показывает, что двойной пропеллер ускоряет поток в медлен-

ных зонах возврата А, В, С, уменьшая их размеры, что свидетельствует о меньшем риске накопления ила и более эффективной тяге. На схеме по цветовой шкале видно, что интенсивность потока по высоте аэротенка при двойном пропеллере (рис. 6, d2) равна 0,1 по сравнению с 0,03 у одинарного пропеллера (рис. 6, d1), это в 3,3 раза больше, что дает более качественное перемешивание в зонах А, В, С и обеспечивает поддержание активного ила во взвешенном состоянии на прямолинейных участках аэротенка. В целом это способствует более эффективной работе аэротенка.

Выводы

При сравнении распределения скорости потока от одинарного пропеллера и от двойного выявлено, что распределение скорости потока с двойным пропеллером лучше у дна. Также в точках поворотов в областях А, В и С появляется зона возврата воды, которая улучшает общую скорость потока.

Выполненное исследование подтверждает эффективность работы двойного пропеллера. Данные результаты открывают новые перспективы и идеи для проектирования более эффективной системы очистки сточных вод. Это исследование в дальнейшем может быть использовано для оптимизации конструкции аэротенка, управления потоком и конфигурации рабочего колеса в аэротенках.

Библиографический список

1. Clercq B. de, Coen F., Vanderhaegen B., Vanrolleghem P. Calibrating simple models for mixing and flow propagation in waste water treatment plants // *Water Science – Technology*. 1999. Vol. 39 (4). Pp. 61–69.
2. Wicklein E., Rogers K., Hunt R., Gharagozian A., Cocke M., Roy P. CFD Modeling of Activated Sludge Mixing in an Oxidation Ditch Conversion // *Proceedings of the Water Environment Federation*. 2013. Vol. 10. Pp. 5142–5152.
3. У. Инъин. Моделирование поля течения и растворенного кислорода в аэротенке на примере станции очистки сточных вод Пиндиншань: диссертация. Ухань: Хуачжунский университет науки и технологии, 2009.

4. Чжан Туцяо, Инъ Зэгао, Мао Гэньхай. Численное моделирование турбулентности в изогнутом круглом воздуховоде // *Журнал гидроэлектротехнического машиностроения*. 2005. № 24 (3). С. 61–65.

5. Лю Юйлин, Чжэн Янь, Вэй Вэньли. Численное моделирование дополнительных устройств в аэротенке-карусели для улучшения распределения скорости потока // *Журнал Сычуаньского университета (инженерные науки)*. 2014. № 46 (05). С. 1–6.

6. Li S. X., Wang P., Lu T. Numerical simulation of direct contact condensation of subsonic steam injected in a water pool using VOF method and LES turbulence model // *Progress in nuclear energy*. 2015. Vol. 78. Pp. 201–205.

References

1. Clercq B. de, Coen F., Vanderhaegen B., Vanrolleghem P. Calibrating simple models for mixing and flow propagation in waste water treatment plants. *Water Science – Technology*, 1999, vol. 39 (4), pp. 61–69.
2. Wicklein E., Rogers K., Hunt R., Gharagozian A., Cocke M., Roy P. CFD Modeling of Activated Sludge Mixing in an Oxidation Ditch Conversion. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2013, vol. 10, pp. 5142–5152.
3. In'ın U. *Modelirovanie polya techeniya i rastvorennoy kisloroda v aerotenke na primere stantsii ochistki stochnykh vod Pindinshan'*: dissertatsiya [Modeling of flow field and dissolved oxygen in aeration tank using Pingdingshan wastewater treatment plant as an example: dissertation]. Wuhan, Huazhong University of Science and Technology Publ., 2009.
4. Yingying Wu, Chzhan Tutsyao, In' Zegao, Mao Gen'khay. *Chislennoe modelirovanie turbulentnosti v izognutom kruglom vozdukhovode* [Numerical modeling of turbulence in a curved circular duct]. *Zhurnal gidroelektrotekhnicheskogo mashinostroeniya – Journal of Hydroelectric Engineering*, 2005, no. 24 (3), pp. 61–65.
5. Lyu Yuylin, Chzhen Yan', Vey Ven'li. *Chislennoe modelirovanie dopolnitel'nykh ustroystv v aerotenke-karuseli dlya uluchsheniya raspredeleniya skorosti potoka* [Numerical modeling of additional devices in a carousel aeration tank for improving flow velocity distribution]. *Zhurnal Sychuan'skogo universiteta (inzhenernye nauki) – Journal of Sichuan University (Engineering Science)*, 2014, no. 46 (05), pp. 1–6.
6. Li S. X., Wang P., Lu T. Numerical simulation of direct contact condensation of subsonic steam injected in a water pool using VOF method and LES turbulence model. *Progress in Nuclear Energy*, 2015, vol. 78, pp. 201–205.