

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ОТ СВАРОЧНОГО АЭРОЗОЛЯ

### EXAMINATION OF DEVICE FOR AIR PURIFICATION FROM WELDING AEROSOL

Предметом исследования является процесс очистки воздуха от твердых частиц сварочного аэрозоля в сварочном цехе. Выполнен анализ дисперсного состава сварочного аэрозоля. Для обеспечения нормируемого качества воздуха в помещениях сварочных цехов предложено дополнение общеобменной системы вентиляции передвижным устройством для сбора пыли с фильтром. Представлен новый тип передвижного устройства для очистки воздуха от твердых частиц. Предложены четыре варианта конструкции передвижного локального агрегата: базовая конструкция без дополнительных элементов для перемешивания; с одно- и двухслойной сеткой; с двумя лопастями и сеткой между ними. Для обоснования выбора наиболее рационального варианта выполнено численное моделирование процессов взаимодействия газа и жидкости в гидродинамическом комплексе ANSYS Fluent. Получены результаты численного эксперимента в виде площади контакта газ–жидкость для каждого варианта, подтверждающие целесообразность использования варианта с двумя лопастями и сеткой между ними, в котором обеспечивается наибольшая площадь контакта газа и жидкости.

*Ключевые слова:* вентиляция, сварочный аэрозоль, передвижное устройство, численный эксперимент.

The subject of research is the process of air purification from solid particles of welding aerosol in the welding workshop. There was performed an analysis of the dispersed composition of the welding aerosol. To ensure the standardized air quality in the premises of welding shops, it is proposed to supplement the general ventilation system with a mobile device for collecting dust with a filter. A new type of mobile device for purification of air from solid particles is presented. There are proposed four versions of the mobile local unit design: basic design without additional elements for mixing; a design with one- and two-layer mesh; with two blades and mesh between them. In order to justify the choice of the most rational option, numerical modeling of gas-liquid interaction processes in the ANSYS Fluent hydrodynamic complex was performed. There are obtained results of a numerical experiment in the form of a gas-liquid contact area for each option confirming the feasibility of using an option with two blades and a mesh between them, in which the largest gas-liquid contact area is provided.

*Keywords:* ventilation, welding aerosol, mobile device, numerical experiment.

#### Введение

Сварка является наиболее распространенным технологическим процессом в промышленном производстве [1–4]. В большинстве случаев сварочные работы проводятся не на стационарных постах, а по всей площади сварочного цеха. Изменение мест проведения сварочных работ и малый размер твердых частиц сварочного аэрозоля затрудняют организацию процесса локализации вредных веществ,

что приводит к интенсивному распространению в сварочном цехе таких вредных веществ, как оксиды марганца, железа, алюминия и титана, а также оксидов углерода и азота, озона, фтористого водорода, фосгена и т. д.

Исследования показали [5], что 87 % сварочного аэрозоля имеют размер частиц 0,1–1,0 мкм, а 11 % — менее 0,1 мкм. Частицы размером менее 0,1 мкм могут проникать в легкие, неблагоприятно влияя на физическое

и психическое здоровье сварщиков и вызывать хронические заболевания [6]. Сварочный аэрозоль, находящийся во взвешенном состоянии в воздухе помещений, при отсутствии эффективных вытяжных устройств ухудшает состояние воздушной среды сварочного цеха, несмотря на функционирование общеобменных систем вентиляции.

Согласно исследованиям [7] частицы размером менее 1 мкм в течение часа после образования сварочного аэрозоля в результате эффекта агрегации становятся более крупными. Частицы размером более 2,5 мкм будут осаждаться под действием силы тяжести, поэтому исследование улавливания твердых частиц сварочного аэрозоля сосредоточено на изучении улавливания мелких частиц с размером менее 2,5 мкм.

#### Методы

В работе [8] представлены теоретические основы влияния сил гравитации, плавучести и сопротивления на движение твердых частиц, что необходимо учитывать в исследованиях по удалению сварочных аэрозолей в сварочных цехах.

Учитывая сложность аналитических решений уравнений, описывающих вышеприведенные силы, для разработки технических средств улавливания взвешенных частиц и инженерных методов расчета использованы результаты численного моделирования, полученные при участии автора [8]. В качестве аналогов и прототипа при подготовке заявки на полезную модель устройства для очистки воздуха от твердых частиц использованы патенты на изобретения подобных устройств на основе жидкостной ванны [9–11].

Известно, что численные методы в настоящее время широко применяются как для расчетов технологических процессов, в том числе и сварочных производств [12–14], так и для оценки состояния воздушной среды помещений различного назначения [3, 15, 16]. Чтобы разработать эффективную систему очистки воздуха в соответ-

ствии с основными принципами мокрой очистки пыли, объект исследования был упрощен, и с учетом результатов численных экспериментов [17–19] с помощью программного обеспечения ANSYS Fluent проведено моделирование процесса движения запыленного воздушного потока внутри пылесборника. Настройки модели и информация о сетке:

- метод расчета: simple;
- модель многофазного потока: PBM-модель на основе модели Eulerian;
- модель разрушения пузырьков: Luo-модель;
- модель объединения пузырьков: Luo-модель;
- модель турбулентности: SST k-w;
- модель системы перемешивания: MRF;
- интервал времени: адаптивный интервал в зависимости от максимального числа Courant;
- максимальное число Courant: 5;
- количество сеток: адаптивное шифрование сетки в соответствии с минимальным размером сетки;
- минимальный размер сетки: 0,5 мм;
- максимальный коэффициент искажения сетки: 0,6;
- минимальное ортогональное соотношение сетки: 0,2;
- Y+: меньше 5.

Допущения:

1) принято считать запыленный воздух чистым газом, загрязненную воду — чистой жидкостью;

2) основным фактором, влияющим на эффективность пылеудаления, является площадь контакта двух фаз — газа и жидкости.

#### Результаты

Для разработки технических устройств локализации взвешенных частиц необходимо определить гранулометрический состав частиц сварочного аэрозоля, для чего в работе использован аэрозольный грануломе-

трический спектрометр. Результаты показывают (рис. 1), что большая часть частиц имеет размер менее 0,5 мкм [8].

Современные передвижные фильтровентиляционные агрегаты, применяемые в производственных помещениях, практически не обеспечивают удаление мелких частиц размером менее 2,5 мкм. В результате исследований, представленных в [8], предложено передвижное техническое устройство (рис. 2 и 3).

В данном исследовании рассмотрено четыре варианта конструкции (см. рис. 2):

- 1 — базовая конструкция, без дополнительных элементов;
- 2 — дополнение базовой конструкции однослойной металлической сеткой;
- 3 — дополнение базовой конструкции двухслойной металлической сеткой;
- 4 — дополнение базовой конструкции двумя лопастями перемешивания и сеткой между ними.

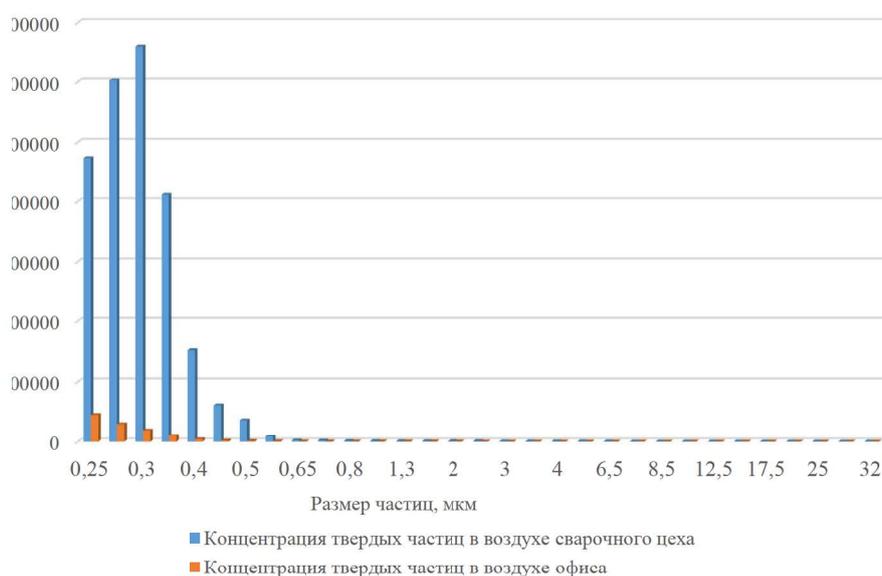


Рис. 1. Характеристики гранулометрического состава частиц сварочного аэрозоля

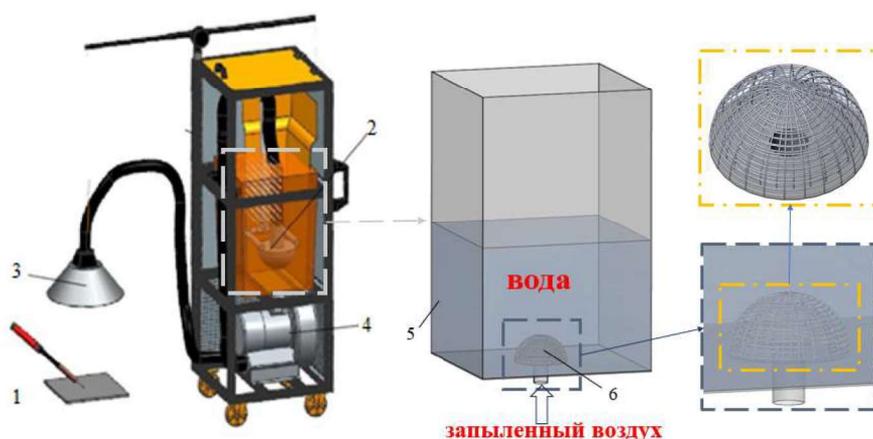


Рис. 2. Схема конструкции водяного пылесборника с аэратором: 1 — зона сварочных работ; 2 — передвижная установка; 3 — пылеприемник; 4 — вентилятор; 5 — пылесборник; 6 — аэратор с металлической сеткой

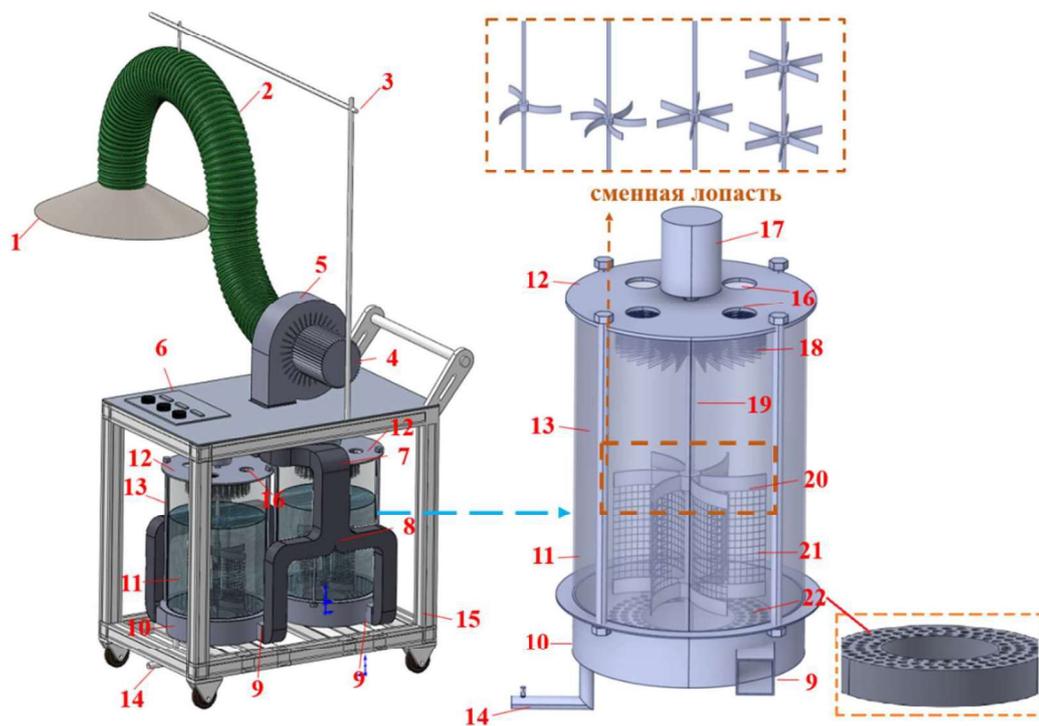


Рис. 3. Водяной пылесборник с перемешивающими лопастями: 1 — пылеприемник; 2 — гофрированная соединительная труба; 3 — кронштейн; 4 — электродвигатель; 5 — вентилятор; 6 — панель управления; 7 — воздухопровод; 8 — распределитель потоков; 9 — входная труба пылесборника; 10 — дно пылесборника; 11 — корпус пылесборника; 12 — крышка пылесборника; 13 — внешние шпильки пылесборника; 14 — водоотводящая труба; 15 — кронштейн; 16 — выпускное отверстие пылесборника; 17 — двигатель мешалки; 18 — волокно для осушения; 19 — вал мешалки; 20 — лопасть мешалки; 21 — проволочная сетка; 22 — газораспределитель

Вариант 1 соответствует известной технологии мокрого способа пылеудаления при наличии в конструкции пылеуловителя водяной ванны (см. рис. 2). Принцип улавливания пыли заключается в том, что запыленный воздушный поток поступает в воду из нижней части пылесборника и в процессе взаимодействия вода поглощает частицы, содержащиеся в воздухе. В вариантах 2 и 3 используют соответственно одно- и двухслойные металлические сетки для уменьшения размеров пузырьков воздуха.

Теоретически увеличение количества слоев металлической сетки может привести к дальнейшему увеличению площади контакта двух фаз, однако это значительно повышает сопротивление устройства, ограничивает скорость движения потока и требует более частой регенерации. В данном исследовании

предлагается вариант 4, который позволяет решить проблему засорения с использованием перемешивающих лопастей. Конкретная конструкция представлена на рис. 3.

Пылесборник в направлении снизу–вверх разделен на две зоны: зону перемешивания и зону осушения. В четвертом варианте конструкции в зоне перемешивания для увеличения площади взаимодействия газа и жидкости расположены верхняя и нижняя лопасти, а между ними проволочная сетка. Следующая зона предназначена для осушения удаляемого из локального передвигного устройства газа с помощью каплеулавливающих волокон.

Благодаря перемешивающим лопастям взвешенные мелкие частицы из воздуха частично улавливаются жидкостью и далее запыленный воздух движется вверх. В перемешивающих лопастях и металлической сетке

капли продолжают измельчаться. Затем воздух попадает в зону осушения.

Автором использовано коммерческое программное обеспечение [17] для моделирования процесса взаимодействия газа

и жидкости. Процессы движения газа через жидкость высотой 0,1–0,2 м показаны на рис. 4–7. Площадь контакта двух фаз, газа и жидкости, рассчитывается методом интегрирования, как показано на рис. 8.

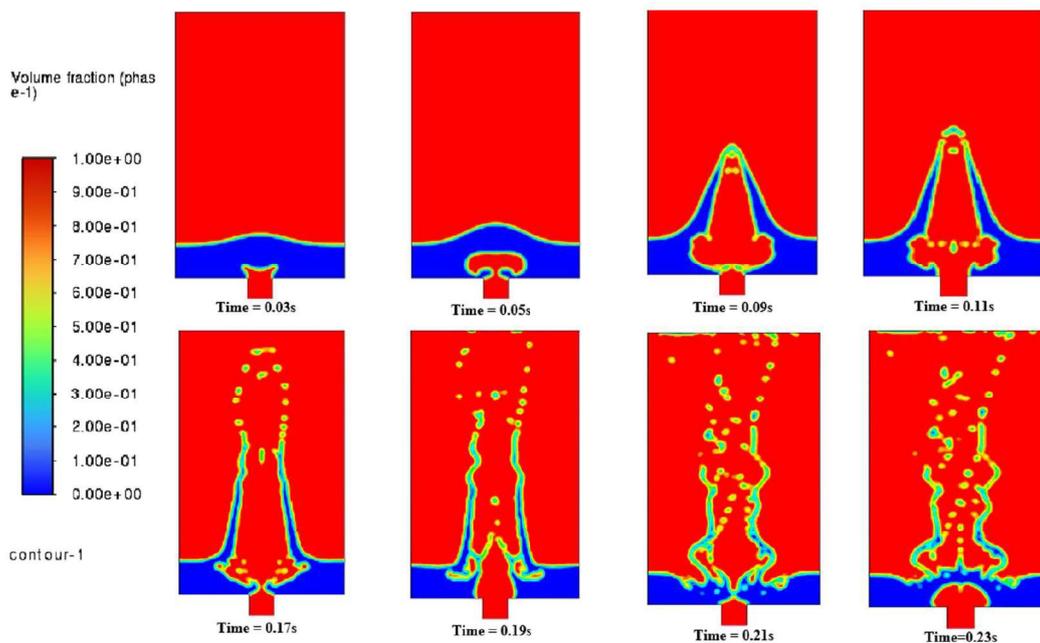


Рис. 4. Процесс движения газа в варианте 1

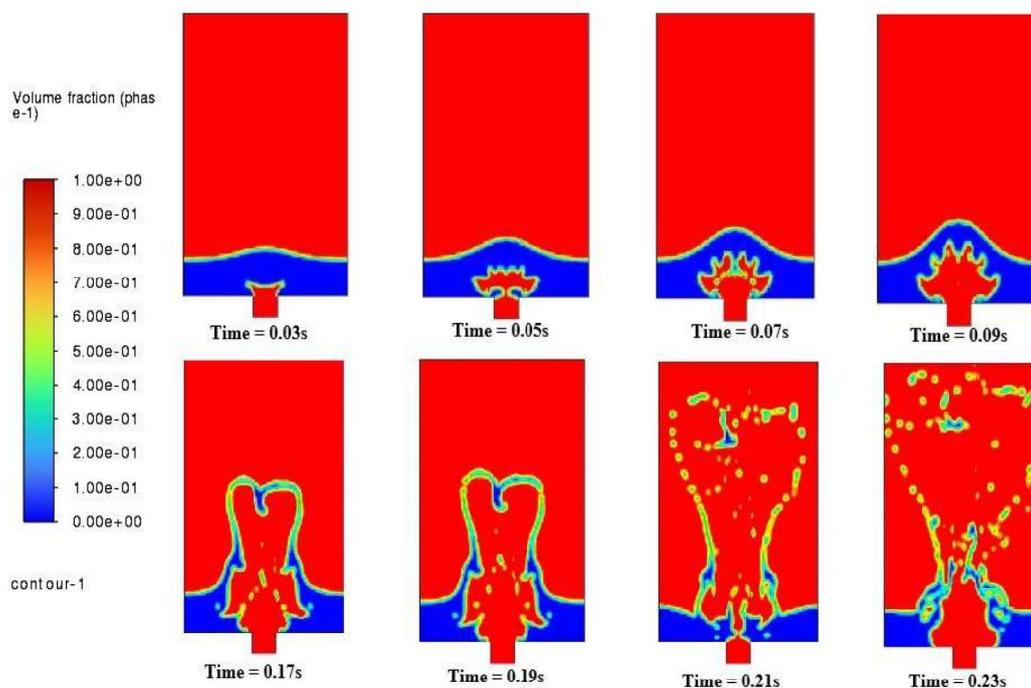


Рис. 5. Процесс движения газа в варианте 2

На рис. 4 воздух поступает непосредственно из нижней части пылесборника в воду. Поскольку нет устройства для измельчения, пузырьки воздуха укрупняются и через промежуток времени  $t = 0,11$  с прорывают поверхность жидкости. Затем под действием поверхностного натяжения жидкости образуются жидкая пленка и капли ( $t = 0,17$  с).

Далее жидкая пленка под действием силы тяжести опускается, но быстро достигает равновесия под действием импульса воздушного потока ( $t = 0,21$  с), после чего жидкость в пылесборнике достигает практически стабильного состояния ( $t = 0,23$  с).

На рис. 5 видно, что при взаимодействии с однослойной сеткой воздух частично рас-

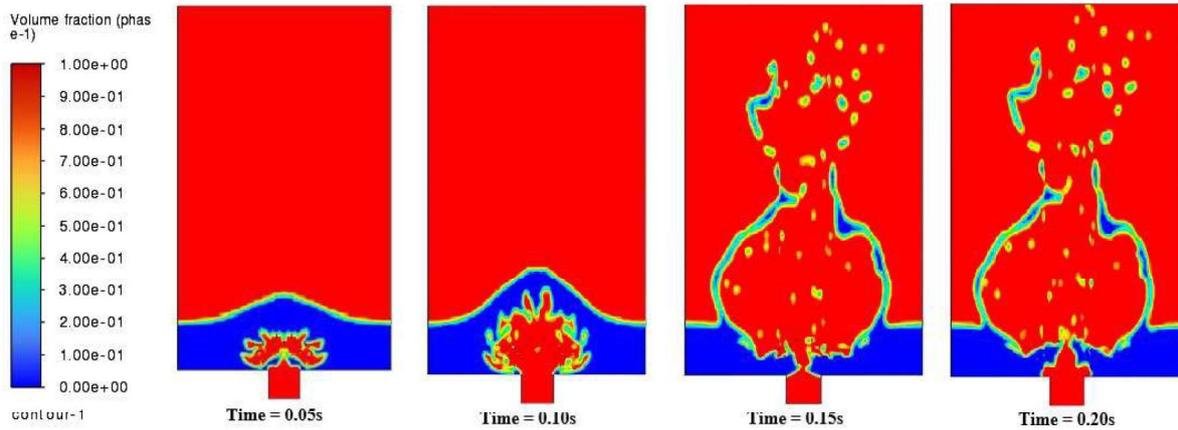


Рис. 6. Процесс движения газа в варианте 3

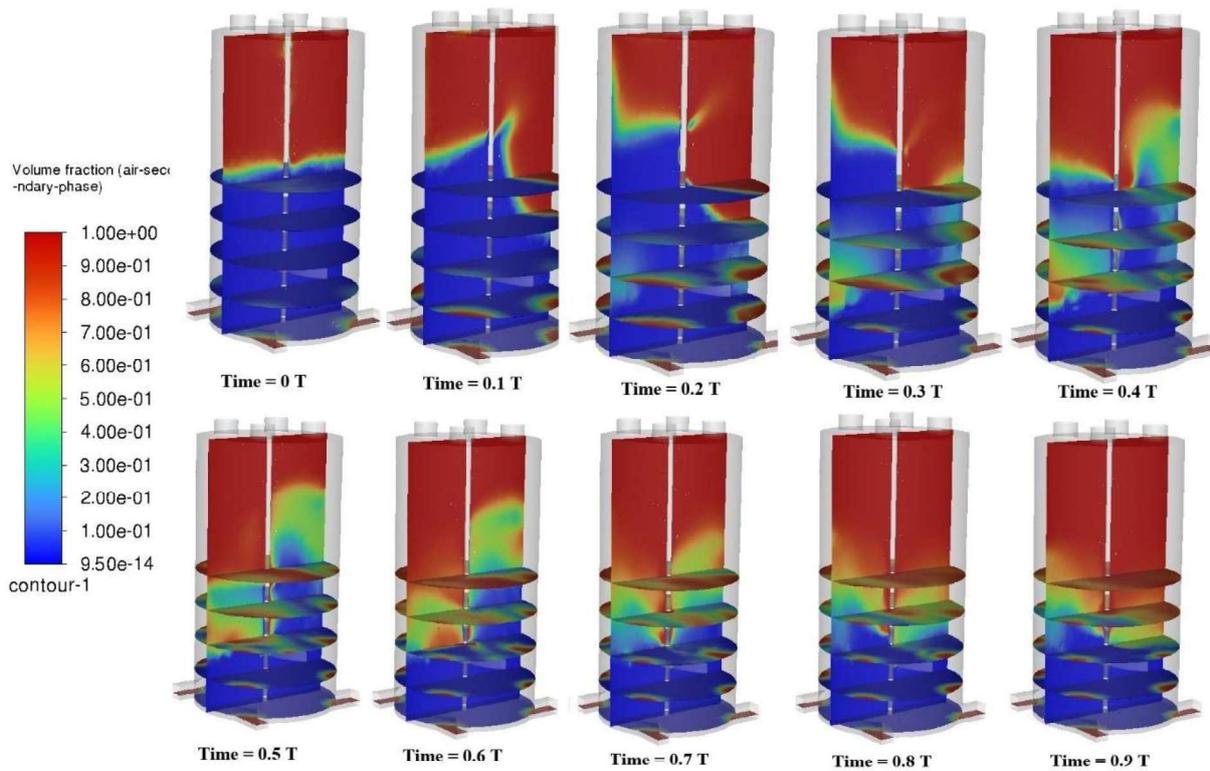


Рис. 7. Процесс движения газа в варианте 4

пределяется в воде, одновременно под действием сил плавучести движется вверх, прорывает поверхность и постепенно достигает стабильного состояния с существенным расширением зоны взаимодействия.

На рис. 6 при взаимодействии с двухслойной металлической сеткой пылевоздушный поток разбивается на несколько потоков в разных направлениях, одновременно поднимается вверх под действием плавучести, прорывает поверхность и постепенно достигает стабильного состояния под действием силы тяжести, импульса воздушного потока и поверхностного натяжения капель. Это состояние имеет явные отличия от рис. 4 и 5, в которых на границе раздела фаз газа и жидкости образуется структура, близкая к шаровой ( $t = 0,15$  с,  $t = 0,20$  с), а в верхней части воздушный поток прорывает жидкую пленку, при этом образуются прерывистая жидкая пленка и капли. Благодаря нали-

чию жидкой пленки площадь контакта газа и жидкости в данном варианте значительно больше, чем в двух предыдущих.

В схеме на рис. 7 используется круглый цилиндр пылесборника диаметром 300 мм и высотой 650 мм. Газ подается в нижнюю часть пылесборника, входное сечение которого имеет квадратную форму ( $100 \times 100$  мм). Скорость вращения лопастей смесителя составляет 120 об./мин. Из-за наличия перемешивающих лопастей газ, поступающий в жидкость, при подъеме вверх вращается под действием перемешивающих лопастей, что способствует увеличению площади контакта газовой и жидкой фаз.

### Обсуждение

На рис. 8 представлены результаты изменения во времени площади контакта воздушного потока и жидкости. Видно, что площадь контакта между газом и жидкостью при использовании водяной ванны без до-

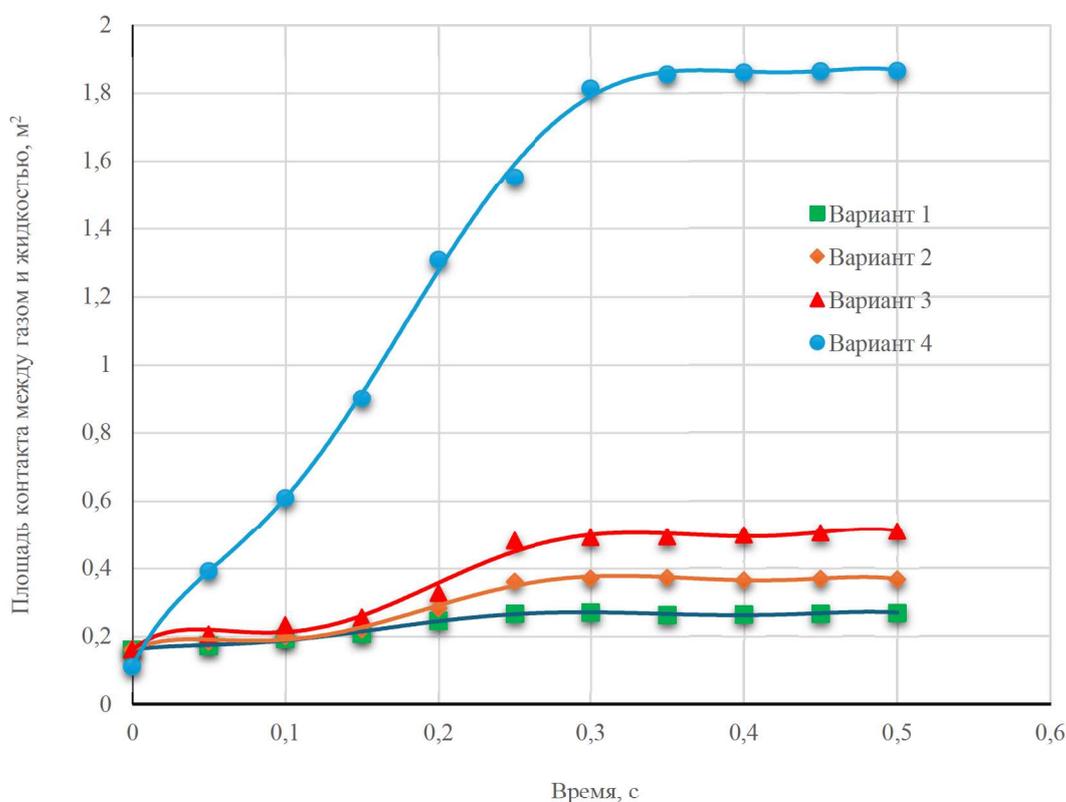


Рис. 8. Изменение площади контакта между газом и жидкостью во времени

полнительных элементов составляет 0,25 м<sup>2</sup>; при наличии одной сетки — 0,38 м<sup>2</sup>; двухслойной сетки — 0,5 м<sup>2</sup>. Применение двух лопастей с сеткой между ними способствует увеличению площади до 1,85 м<sup>2</sup>.

Очевидно, что в варианте 4 при использовании перемешивающих лопастей площадь контакта двух фаз значительно больше, чем в трех других вариантах. При участии автора создана экспериментальная установка, описание и результаты исследований подробно приведены в работе [20]. Имеют место результаты, идентичные численному эксперименту.

Таким образом, основным фактором, влияющим на эффективность пылеудаления, является площадь контакта между газом и жидкостью. При изменении формы лопастей и скорости вращения площадь контакта газа и жидкости также изменяется, и теоретически этот вариант в дальнейшем может быть оптимизирован.

#### Выводы

1. Анализ гранулометрического состава сварочного аэрозоля в воздухе сварочного цеха показал, что большая часть частиц имеет размер менее 0,5 мкм, что требует разработки локальных передвижных устройств, обеспечивающих их эффективное улавливание.

2. Известные передвижные агрегаты с пористыми материалами для очистки имеют низкую эффективность улавливания частиц размером менее 0,5 мкм.

3. Предложены 4 варианта конструкции передвижного локального агрегата: без дополнительных элементов, с однослойной и двухслойной сетками, а также с двумя лопастями и сеткой между ними.

4. Результаты численного моделирования подтверждают целесообразность использования варианта с двумя лопастями и сеткой между ними, так как площадь контакта газа и жидкости в этом случае увеличивается по сравнению с другими конструктивными решениями в 3,7–7,4 раза.

#### Библиографический список

1. *Гримитлин М. И., Позин Г. М., Тимофеева О. Н.* и др. Вентиляция и отопление цехов машиностроительных предприятий. М.: Машиностроение, 1993. 286 с.
2. *Писаренко В. Л., Рогинский М. Л.* Вентиляция рабочих мест в сварочном производстве. М.: Машиностроение. 1981. 120 с.
3. *Сиваченко Ю. А.* Совершенствование локальных вентиляционных систем при плазменной обработке металлов: дис... канд. техн. наук. Симферополь, 2024. 163 с.
4. *Уляшева В. М., Анисимов С. М., Шамколович А. Н.* Численное моделирование вентиляционных процессов в сварочном цехе // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 3 (74). С.118–124.
5. *Kuei-Min Yu.* Decreasing biotoxicity of fume particles produced in welding process // Journal of Hazardous Materials. Vol. 185. Iss. 2–3. 30 January 2011. Pp. 1587–1591.
6. *Yongyue Chen.* Associations of ambient particulate matter and household fuel use with chronic liver disease in China: A nationwide analysis [J] // Environment International. Vol. 193. November 2024, 109083.
7. *Kirichenko K. Yu.* Nano- and Microparticles in Welding Aerosol: Granulometric Analysis // Physics Procedia. Vol. 86. 2017. Pp. 50–53.
8. *Джин Хевэй, Пономарев Н. С., Сон Я. П., Рогожина Т. С.* Численное моделирование системы вентиляции сварочных цехов больших объемов // Вестник гражданских инженеров. 2024. № 1 (102). С. 84–94.
9. SEPARATOR FOR VACUUM CLEANER. Пат. US7203992B2, 2007.
10. SEPARATOR FOR VACUUM CLEANER. Пат. EP3934502B1, 2020.
11. Патент № 2739406 Российской Федерации СПК В01D47/00 (2020.08). Установка очистки воздуха: № 2019131033 : заявл. 30.09.2019 : опубли. 23.12.2020 / Красильников К. Л., Тырцев А. Н., Каменских А. П., Ельшин А. В., Макарова Л. Е.; заявитель ООО «Новитек». 15 с.
12. *Светушков Н. Н.* Возможности компьютерного моделирования процессов термической обработки // Труды МАИ. Вып. № 58. URL: <https://mai.ru/upload/iblock/b2f/vozmozhnosti-kompyuternogo-modelirovaniya-protssesov-termicheskoy-obrabotki.pdf>
13. *Савицкий Д. В., Аксёнов А. А., Жлуктов С. В.* Численное моделирование взаимодействия аргоновой плазмы с углеродным образцом теплозащитного покрытия // Труды МАИ. Вып. № 101. URL: [https://trudymai.ru/upload/iblock/a97/Savitskiy\\_Aksyenov\\_ZHluktov\\_rus.pdf?lang=en&issue=101](https://trudymai.ru/upload/iblock/a97/Savitskiy_Aksyenov_ZHluktov_rus.pdf?lang=en&issue=101)

14. Федяев В. Л., Осипов П. П., Беляев А. В., Сироткина Л. В. Математическое моделирование процессов, протекающих при электроконтактной сварке деталей с покрытиями // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23, № 4. С. 149–158. DOI 10.18721/JEST230415. URL: [https://engtech.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2017/4/15\\_fedyayev.pdf](https://engtech.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2017/4/15_fedyayev.pdf)

15. Шантала В. В., Хукаленко Е. Е., Северин Н. Н., Лусев Ю. М. Устройства и процессы вентиляции при выполнении электросварочных работ // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2020. № 9. С. 21–29. DOI 10.34031/2071-7318-2020-5-9-21-29.

16. Цынаева А. А., Цынаева Е. А. Численное исследование микроклимата помещения с использованием СПО // Труды Института системного программирования РАН. 2021;33(5):259-270. URL: [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2021-33\(5\)-16](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2021-33(5)-16)

17. Valdes J. P., Asuaje M., Ratkovich N. Study of an ESP's performance handling liquid-liquid flow and unstable O-W emulsions part II: coupled CFD-PBM modelling. J // Pet. Sci. Eng., 2021. Vol. 198. art. 108227. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108227>

18. Andrey Belyaev, Elena Kuts, Vladimir Shabalin. Assessing the performance of units for the synthesis of oligodynamic solutions for water treatment // Architecture and Engineering. Vol. 7. Iss. 2 (2022). Pp. 54–65. DOI 10.23968/2500-0055-2022-7-2-54-65.

19. Arestak Sarukhanyan, Garnik Vermishyan. A study on sudden expansion hydrodynamic phenomena occurring in cylindrical pipes // Architecture and Engineering. Vol. 6. Iss. 4 (2021). Pp. 63–71. DOI 10.23968/2500-0055-2021-6-4-63-71.

20. Джин Хевэй. Экспериментальное исследование эффективности нового типа передвижного фильтровентиляционного устройства с водяной ванной // Инновации и инвестиции. 2025. № 3. С. 485–490.

## References

1. Grititlin M. I., Pozin G. M., Timofeeva O. N., et al. *Ventilyatsiya i otoplenie tsekhov mashinostroitel'nykh predpriyatij* [Ventilation and heating of machine-building workshops]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993, 286 p.

2. Pisarenko V. L., Roginskiy M. L. *Ventilyatsiya rabochikh mest v svarochnom proizvodstve*. [Ventilation of workplaces in welding production]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 120 p.

3. Sivachenko Yu. A. *Sovershenstvovanie lokal'nykh ventilyatsionnykh sistem pri plazmennoy obrabotke metallov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of local ventilation systems in plasma metal processing. PhD in Sci. Tech. diss.]. Spets. 2.1.3. Teplosnabzhenie,

*ventilyatsiya, konditsionirovanie vozdukh, gazosnabzhenie i osveshchenie* [Spec. 2.1.3. Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting]. Simferopol', 2024, 163 p.

4. Ulyasheva V. M., Anisimov S. M., Shamkolovich A. N. *Chislennoe modelirovanie ventilyatsionnykh protsessov v svarochnom tsekh* [Numerical modeling of ventilation processes in the welding shop]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2019, no. 3 (74), pp. 118–124.

5. Kuei-Min Yu. Decreasing biotoxicity of fume particles produced in welding process. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 185, iss. 2–3, 30 January 2011, pp. 1587–1591.

6. Yongyue Chen. Associations of ambient particulate matter and household fuel use with chronic liver disease in China: A nationwide analysis. *Environment International*, vol. 193, November 2024, 109083.

7. Kirichenko K. Yu. Nano- and Microparticles in Welding Aerosol. *Granulometric Analysis. Physics Procedia*, vol. 86, 2017, pp. 50–53.

8. Dzhin Khevey, Ponomarev N. S., Son Ya. P., Rogozhina T. S. *Chislennoe modelirovanie sistemy ventilyatsii svarochnykh tsekhov bol'shikh ob'emov* [Numerical modeling of the ventilation system of welding shops of large volumes]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2024, no. 1 (102), pp. 84–94.

9. SEPARATOR FOR VACUUM CLEANER. Pat. US7203992B2, 2007.

10. SEPARATOR FOR VACUUM CLEANER. Pat. EP3934502B1, 2020.

11. Krasilnikov K. L., Tyrtsev A. N., Kamenskikh A. P., Elshin A. V., Makarova L. E. *Ustanovka ochistki vozdukh* [Air purification unit]. Patent RF, no. 2739406, 2020.

12. Svetushkov N. N. *Vozmozhnosti kompyuternogo modelirovaniya protsessov termicheskoy obrabotki* [Possibilities of computer simulation of heat treatment processes]. *Trudy MAI – Proceedings of the Moscow Aviation Institute*, iss. no. 58. Available at: <https://mai.ru/upload/iblock/b2f/vozmozhnosti-kompyuternogo-modelirovaniya-protsessov-termicheskoy-obrabotki.pdf>

13. Savitskiy D. V., Aksyonov A. A., Zhluktoy S. V. *Chislennoe modelirovanie vzaimodeystviya argonovoy plazmy s uglerodnym obraztsom teplozashchitnogo pokrytiya* [Numerical modeling of the interaction of argon plasma with a carbon sample of a heat-shielding coating]. *Trudy MAI – Proceedings of the Moscow Aviation Institute*, iss. no. 101. Available at: [https://trudymai.ru/upload/iblock/a97/Savitskiy\\_Aksyonov\\_ZHluktoy\\_rus.pdf?lang=en&issue=101](https://trudymai.ru/upload/iblock/a97/Savitskiy_Aksyonov_ZHluktoy_rus.pdf?lang=en&issue=101)

14. Fedyaev V. L., Osipov P. P., Belyaev A. V., Sirotkina L. V. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov,*

*protekayushchikh pri elektrokontaktной сварke detaley s pokrytiyami* [Mathematical modeling of processes occurring during electrocontact welding of coated parts]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki – Scientific and Technical Bulletin of SPbPU. Natural and Engineering Sciences*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 149–158. DOI 10.18721/JEST230415. Available at: [https://engtech.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2017/4/15\\_fedyaev.pdf](https://engtech.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2017/4/15_fedyaev.pdf)

15. Shaptala V. V., Khukalenko E. E., Severin N. N., Gusev Yu. M. *Ustroystva i protsessy ventilyatsii pri vypolnenii elektrovarochnykh rabot* [Ventilation devices and processes during electric welding works]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova – Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, 2020, no. 9, pp. 21–29. DOI 10.34031/2071-7318-2020-5-9-21-29.

16. Tsynaeva A. A., Tsynaeva E. A. *Chislennoe issledovanie mikroklimata pomescheniya s ispol'zovaniem SPO* [Numerical study of the microclimate of the room using open source software]. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN – Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences*, 2021, no. 33 (5),

pp. 259–270. Available at: [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2021-33\(5\)-16](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2021-33(5)-16)

17. Valdes J. P., Asuaje M., Ratkovich N. Study of an ESP's performance handling liquid-liquid flow and unstable O-W emulsions part II: coupled CFD-PBM modelling. *J. Pet. Sci. Eng.*, 2021, vol. 198, art. 108227, Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108227>

18. Andrey Belyaev, Elena Kuts, Vladimir Shabalin. Assessing the performance of units for the synthesis of oligodynamic solutions for water treatment. *Architecture and Engineering*, 2022, vol. 7, iss. 2, pp 54–65. DOI 10.23968/2500-0055-2022-7-2-54-65.

19. Arestak Sarukhanyan, Garnik Vermishyan. A study on sudden expansion hydrodynamic phenomena occurring in cylindrical pipes. *Architecture and Engineering*. Vol. 6. Iss. 4 (2021), pp. 63–71. DOI 10.23968/2500-0055-2021-6-4-63-71.

20. Jin Hewei. *Ekspierimental'noe issledovanie effektivnosti novogo tipa peredvizhnogo fil'troventilyatsionnogo ustroystva s vodyanoy vannoy* [Experimental study of the effectiveness of a new type of mobile filtering and ventilation device with a water bath]. *Innovatsii i investitsii – Innovations and Investments*, 2025, no. 3, pp. 485–490.