

Судовые энергетические установки

Научная статья

УДК 621.791.14:62-97

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/69-74>

В.Н. Стаценко, Р.Х. Садыков, И.А. Гончарова, М.В. Бернавская

СТАЦЕНКО ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ – д.т.н., профессор, vladsta@mail.ru

САДЫКОВ РУСЛАН ХАНАФЬЕВИЧ – старший преподаватель, sadykov_rh@bk.ru

ГОНЧАРОВА ИРИНА АЛЕКСАНДРОВНА – магистрант, goncharovairina027@gmail.ru

Политехнический институт

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

БЕРНАВСКАЯ МАЙЯ ВЛАДИМИРОВНА – доцент, bernavskaya@mail.ru

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Санкт-Петербург, Россия

Обобщение исследований пленочной жидкостной нейтрализации токсичных газовых выбросов

Аннотация. В процессе очистки загрязненных газовых выбросов организовано пленочное течение жидкости по вертикальным пластинам. При их движении между пластинами пленка жидкости как абсорбент интенсивно поглощает газообразные и твердые загрязняющие вещества. Задача настоящей работы – экспериментальное исследование и критериальное обобщение интенсивности абсорбции углекислого газа в пленку жидкости при разных ее расходах, скоростях воздуха, концентрации газа. Анализ результатов экспериментов показал, что оптимальная скорость воздуха составляет 0,8–1 м/с, оптимальное значение орошения равно $(3,3–3,8) \cdot 10^{-4}$ м²/с. При этом концентрацию двуокиси углерода можно снизить на 30–45 % на длине контакта 0,8–1 м. Обобщение полученных результатов в широком диапазоне изменения концентраций газа, расходов жидкости и скорости движения загрязненного газа произведено в виде зависимости между диффузионными критериями Нуссельта и Пекле. Эта зависимость позволяет рассчитать габаритные характеристики жидкостных пленочных массообменных аппаратов. В дальнейших работах будут проводиться исследования абсорбции в пленку жидкости окисей углерода и азота, а также двуокиси серы.

Ключевые слова: газовые выбросы, жидкостная нейтрализация, пленка, жидкость, абсорбция, экспериментальный стенд, двуокись углерода, снижение концентрации, обобщение, критерии

Для цитирования: Стаценко В.Н., Садыков Р.Х., Гончарова И.А., Бернавская М.В. Обобщение исследований пленочной жидкостной нейтрализации токсичных газовых выбросов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 4(53). С. 69–74.

Введение

Жидкостные пленочные массообменные аппараты широко используются в химической технологии в качестве абсорберов газообразных сред в жидкость, нисходящее движение которой организуется внутри вертикальных труб или на плоской вертикальной поверхности [1, 4]. Такие аппараты можно использовать и для очистки технологических уходящих газов, выделяемых, например, при сжигании органического топлива или в ходе проведения различных сварочных операций [3, 5].

Для выполнения расчетов процессов абсорбции при различных условиях необходимо знать величины коэффициентов массоотдачи между газом и пленкой жидкости β_r . При массопередаче между газом и жидкостью возникают сопротивления газовой и жидкой фаз. Доля

каждого из фазовых сопротивлений определяется растворимостью газов. Для хорошо растворимых газов (при константе фазового равновесия $m < 1$) доля сопротивления жидкой фазы невелика. Для очень малых m таким сопротивлением пренебрегают. К этим газам можно отнести NH_3 , HCl , SO_2 .

Для плохо растворимых газов (CO_2 , CO , NO) основное сопротивление массопередаче сосредоточено в жидкой фазе. Для них константа равновесия $m > 100$. Тогда сопротивлением газовой фазы можно пренебречь.

Для умеренно растворимых газов ($m = 1-100$) сопротивления каждой из фаз соизмеримы, и пренебрегать ими нельзя.

При массоотдаче между абсорбируемым газом и пленкой большое значение имеют физико-химические свойства жидкости и может происходить процесс хемосорбции [7]. При поглощении, в частности, оксида углерода CO_2 раствором карбоната натрия происходит химическая реакция, часть CO_2 переходит в связанное состояние с образованием нерастворимого осадка, и концентрация растворенной окиси углерода понижается, соответственно абсорбционная способность раствора повышается. Скорость химической реакции между CO_2 и раствором карбоната натрия имеет относительно низкие значения, поэтому можно считать, что основное сопротивление массопереносу для оксида углерода сосредоточено в жидкой фазе.

Для описания процессов в пленочных тепломассообменных аппаратах обычно используются критериальные уравнения. Каждое из них применимо для определенных условий организации рабочего процесса, конструктивных особенностей аппаратов и т.д. При этом большинство результатов обобщается критериальным уравнением

$$Nu_D = A \cdot 0.1 Re_\Gamma^m Re_{пл}^n Pr_D^p \cdot P/P_\Gamma. \quad (1)$$

Здесь $Nu_D = \beta \cdot l / D$ – критерий Нуссельта, диффузионный; $Re_{пл} = \Gamma_V / \nu_V$ – критерий Рейнольдса, пленочный; $Pr_D = \nu_\Gamma / D$ – критерий Прандтля, диффузионный; β – коэффициент массоотдачи, м/с; D – коэффициент диффузии, м²/с; l – определяющий размер, м; $\Gamma_V = G_{пл} / \Pi$ – орошение пластины пленкой жидкости, м²/с; $G_{пл}$ – расход пленки воды, м³/с; Π – смоченный периметр рабочего канала, м; ν_Γ , ν_V – кинематические вязкости воздуха и воды, м²/с; P_Γ , P – давление газа в ядре потока и у поверхности жидкости.

Константы A , m , n , p имеют значительные расхождения, особенно при малых $Re_{пл}$. Это объясняется тем, что исследователи работали в узких диапазонах изменения $Re_{пл}$ и применяли различные условия эксперимента.

Цель настоящей статьи – обобщить в критериальной форме результаты исследования интенсивности снижения концентрации двуокиси углерода в установке жидкостной пленочной нейтрализации.

Описание технического решения

В нашей работе для очистки воздуха от газовых выбросов и аэрозолей предлагается использование жидкостного пленочного нейтрализатора [2, 8]. Эта установка представляет собой закрытый корпус с вертикально установленными пластинами, в верхней части которых закреплены пленкообразующие устройства; с их помощью жидкость растекается по обеим сторонам пластин в виде пленки. Загрязненный газ поступает в корпус снизу через входной патрубок и движется вверх между пластинами. Благодаря большой площади контакта пленка жидкости как абсорбент интенсивно поглощает газообразные и твердые загрязняющие вещества и, стекая вниз по пластинам, удаляется из корпуса фильтра. Жидкость после очистки и нейтрализации может подаваться на пленкообразующие устройства для повторного использования. Нейтрализаторы такого типа обладают существенным достоинством – низким гидравлическим сопротивлением и малым брызго- и влагоуносом, что является важным фактором для очистки выхлопных газов двигателей.

Для изучения рабочих процессов, происходящих в жидкостном пленочном нейтрализаторе, проведены исследования на экспериментальном стенде, основным элементом которого

являлись латунные пластины длиной 1100 и 600 мм [8]. Они жестко закреплены в корпусе с патрубками входа загрязненного и выхода очищенного воздуха. Подача воды на латунную пластину осуществляется через пленкообразующее устройство, пленка воды движется вниз по поверхности рабочей пластины, очищаемый воздух движется вверх, при их контакте происходят процессы абсорбции газов в пленку жидкости и осаждение твердых частиц на поверхности пленки. Для измерения скорости воздуха используется трубка Прандтля с U-образным жидкостным манометром, расход жидкости определяется объемным способом и контролируется по жидкостному манометру.

Основной задачей исследований является определение зависимости изменения концентрации различных газовых и аэрозольных загрязнений по длине рабочей пластины. В настоящей работе в качестве газового загрязнения используется двуокись углерода CO_2 , начальная концентрация задавалась в диапазоне $C_0 = 1,2\text{--}4,5\%$.

Результаты измерений изменения концентрации двуокиси углерода CO_2 по длине контакта в воде при скорости воздуха $V_{\text{воз}} = 0,5\text{--}1$ м/с представлены на рис. 1. В качестве характеристик процесса абсорбции использовались критерии Re_{Γ} (газовый) и $Re_{\text{пл}}$ (пленочный):

$$Re_{\Gamma} = V_{\text{воз}} \cdot d_{\text{экв}} / \nu_{\Gamma}, \quad (2)$$

$$Re_{\text{пл}} = \Gamma_V / \nu_B, \quad (3)$$

где $d_{\text{экв}} = \sqrt{4S/\pi}$ – эквивалентный диаметр, м; S – площадь сечения рабочего канала, м².

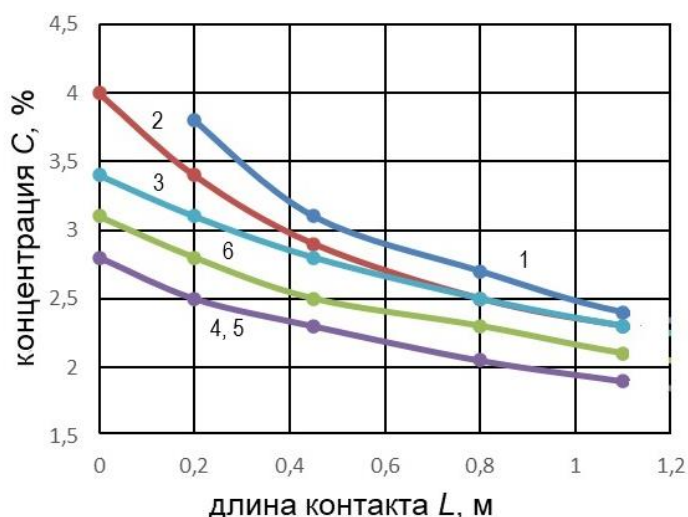


Рис. 1. Изменение концентрации CO_2 по длине контакта; $t_r = 17^\circ\text{C}$; $Re_{\Gamma} = 20\text{--}10^3$; 1 – $Re_{\text{пл}} = 110$; 2 – 230; $Re_{\Gamma} = 31\text{--}10^3$; 3 – $Re_{\text{пл}} = 76$; 4 – 45; 5 – 28; $t_r = 120^\circ\text{C}$; 6 – $Re_{\Gamma} = 19 \cdot 10^3$; $Re_{\text{пл}} = 76$

При исследованиях абсорбции углекислого газа получены следующие результаты.

1. Зависимость снижения концентрации газа по длине рабочей пластины имеет экспоненциальный характер. Наиболее значительное изменение концентрации происходит на начальном рабочем участке.

2. Интенсивность изменения концентрации газа по длине значительно зависит от начальной его концентрации. Чем выше начальная концентрация, тем значительнее ее изменение.

3. При использовании воды в качестве абсорбирующей среды оптимальная скорость воздуха составляет $V_{\text{воз}} = 0,8\text{--}1$ м/с, оптимальное значение орошения – $\Gamma_V = (3,3\text{--}3,8) \cdot 10^{-4}$ м²/с. При этом концентрация газа CO_2 снижается на 30–45%.

Результаты обобщения

Обобщение результатов исследований абсорбции двуокиси углерода CO_2 в пленку жидкости произведено в системе безразмерных критериев, предложенных в [6]:

$$Nu_D \approx Pe_D. \quad (4)$$

Здесь $Nu_D = g_\Gamma \delta / (\rho D \Delta C)$ – критерий Нуссельта, диффузионный; $Pe_D = Re_{пл} Pr_D (\delta/L)$ – критерий Пекле, диффузионный; $g_\Gamma = G_{аб}/S_{аб}$ – удельный поток абсорбированного газа, кг/(м²·с); $S_{аб} = \Pi \cdot \Delta L$ – площадь абсорбции, м²; ΔL – участок канала, м; ΔC – концентрационный напор (движущая сила абсорбции), кг/м³; ρ – плотность газа, кг/м³; δ – толщина пленки, м; L – длина контакта, м. Остальные составляющие критериев Nu_D и Pe_D представлены в описании уравнения (1).

В расчетах критерия Pe_D использованы экспериментальные и справочные данные. При расчете критерия Nu_D поток абсорбированного газа $G_{аб}$ (кг/с) на каждом участке рабочего канала ΔL находится по измеренным значениям его концентрации в потоке воздуха перед C_{i-1}^Γ и за участком C_i^Γ (кг/м³):

$$G_{аб} = V_{воз} S_{сеч} (C_{i-1}^\Gamma - C_i^\Gamma). \quad (5)$$

Здесь $S_{сеч} = \Pi \cdot h$ – площадь сечения воздушного канала, м²; $V_{воз}$ – скорость воздуха в рабочем канале, м/с; h – высота сечения, м; Π – смоченный периметр рабочего канала, м.

Концентрация абсорбированного газа в пленке воды на каждом участке C_i^B , (кг/м³) и концентрационный напор ΔC (кг/м³) рассчитываются по следующим зависимостям:

$$C_i^B = C_{i-1}^B + \frac{G_{аб}}{G_{плm}}, \quad (6)$$

$$\Delta C = C_i^\Gamma - C_i^B. \quad (7)$$

Здесь C_{i-1}^B – концентрация газа в пленке перед участком рабочего канала, кг/кг; C_i^Γ , C_i^B – средние на участке ΔL значения концентраций газа в воздухе и пленке, кг/кг; $G_{плm} = G_{пл} \rho$ – массовый расход пленки воды, кг/с.

Результаты обработки наших данных по абсорбции углекислого газа CO_2 в пленке пресной воды, полученные в широком диапазоне изменения критериев Re_Γ , $Re_{пл}$, представлены на рис. 2. По этим данным получено критериальное уравнение:

$$Nu_D = 1,57 Pe_D^{0,64}. \quad (8)$$

Наши экспериментальные данные обобщаются этими уравнениями с погрешностью $\pm 25\%$.

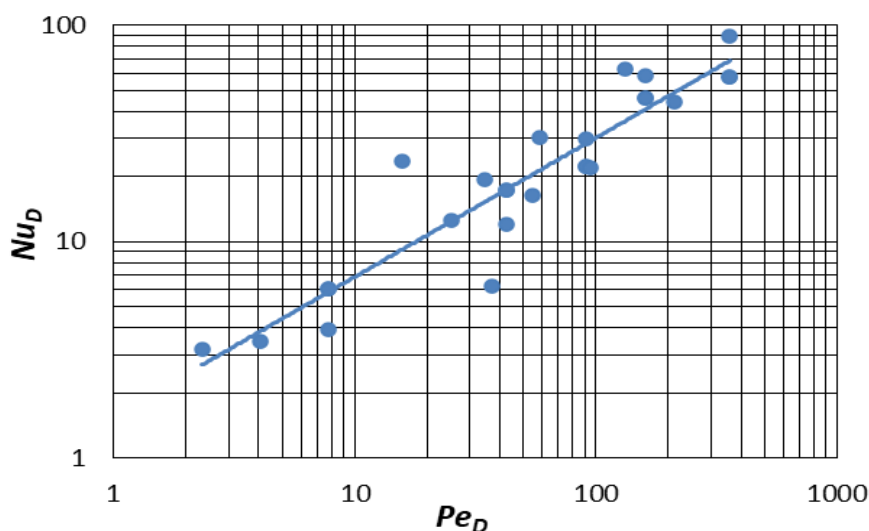


Рис. 2. Обработка экспериментальных данных по абсорбции CO_2 в безразмерных координатах

Полученная критериальная зависимость по абсорбции углекислого газа в пленку воды позволяет рассчитать локальные значения коэффициентов массоотдачи и абсорбции газа в пленку жидкости по длине контакта и, соответственно, габаритные характеристики жидкостных пленочных массообменных аппаратов в широком диапазоне изменения концентраций газа, расходов жидкости и скорости движения загрязненного воздуха или газа.

Заключение

В результате анализа процесса абсорбции двуокиси углерода CO_2 в пленочном жидкостном аппарате можно сделать вывод, что при использовании воды в качестве абсорбирующей среды оптимальная скорость воздуха составляет $V_{воз} = 0,8–1$ м/с, оптимальное значение орошения равно $\Gamma_v = (3,3–3,8) \cdot 10^{-4}$ м²/с, при этом концентрация газа CO_2 снижается на 30–45 %.

Этот метод может использоваться для очистки технологических выбросов, а также выхлопных газов от различных энергетических установок, в которых обычно содержатся те же токсичные газообразные компоненты и твердые частицы. Жидкостные нейтрализаторы являются обязательной составляющей систем нейтрализации отработанных газов для специальных подземных установок с дизелями, для дизельных погрузочно-транспортных машин и специального самоходного оборудования, которые работают во взрывоопасной среде (шахтах, рудниках и др.). Системы жидкостной нейтрализации применяются также для судовых дизельных установок, где в качестве рабочей жидкости используется забортная вода.

Основной задачей будущих исследований является определение изменения концентрации таких токсичных составляющих выхлопных газов, как CO , SO_2 и NO_x , а также аэрозольных загрязнений от длины контакта при жидкостной пленочной нейтрализации. Результаты этих исследований будут обобщаться в виде критериальных зависимостей.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Абсорбция газовых примесей. URL: <https://msd.com.ua/processy-inzhenernoj-zashhity-okruzhayushhej-sredy/?ysclid=1669mlsz4965855379> (дата обращения: 09.08.2022).
2. Бернавская М.В., Стаценко В.Н. Комплексное решение проблемы экологической безопасности автономных гидротехнических сооружений. Дистанционные методы, технические средства и алгоритмы в прикладных задачах исследования природных сред // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 12. С. 3–12.
3. Вострикова М.А. Анализ эффективности работы систем очистки дымовых газов морских судов от примесей при использовании абсорберов и скрубберов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 4. С. 66–69.
4. Генералов М.Б., Александров В.П., Алексеев В.В. Машины и аппараты химических и нефтехимических производств. Москва: Машиностроение, 2004. 832 с.
5. Гришагин В.М. Сварочный аэрозоль: образование, исследование, локализация, применение. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 213 с.
6. Накоряков В.Е., Григорьева Н.И. О совместном тепломассопереносе при пленочной абсорбции // Теплообмен и гидродинамика при кипении и конденсации. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1979. С. 278–284.
7. Старкова А.В., Махоткин А.Ф., Балыбердин А.С., Махоткин И.А. Механизм и кинетика хемосорбции углекислого газа водным раствором карбоната натрия // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 15. С. 76–81.
8. Стаценко В.Н., Еременко М.А., Бернавская М.В. Метод жидкостной пленочной нейтрализации токсичных газовых выбросов // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2020. № 2(43). С. 88–95.

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/69-74>

Statsenko V., Sadykov R., Goncharova I., Bernavskaya M.

VLADIMIR N. STATSENKO, Doctor Engineering Science, Professor, vladsta@mail.ru

RUSLAN H. SADYKOV, Senior Lecturer, sadykov_rh@bk.ru

IRINA A. GONCHAROVA, Master Student, goncharovairina027@gmail.ru

Department Industrial Safety, Polytechnical Institute

Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

MAYA V. BERNAVSKAYA, Associate Professor, bernavskaya@mail.ru

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

St. Petersburg, Russia

Studies of film liquid neutralization of toxic gas emissions generalization

Abstract. In the process of cleaning polluted gas emissions, a film flow of liquid along vertical plates is organized. When they move between the plates, the liquid film as an absorbent intensively absorbs gaseous and solid pollutants. The objective of this work is an experimental study and criterion generalization of the intensity of carbon dioxide absorption into a liquid film at different flow rates, air velocities, and gas concentrations. Analysis of the experimental results showed that the optimal air velocity is 0.8–1 m/s, the optimal irrigation value is $(3.3–3.8) \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. In this case, the concentration of carbon dioxide can be reduced by 30–45% at a contact length of 0.8–1 m. The generalization of the results obtained in a wide range of changes in gas concentrations, liquid flow rates, and the rate of movement of polluted gas is made in the form of a relationship between the Nusselt and Peclet diffusion criteria. This dependence makes it possible to calculate the overall characteristics of liquid film mass transfer apparatuses. In further work, studies will be carried out on the absorption of carbon and nitrogen oxides, as well as sulfur dioxide, into the liquid film.

Keywords: gas emissions, liquid neutralization, film, liquid, absorption, experimental stand, carbon dioxide, concentration reduction, generalization, criteria

For citation: Statsenko V., Sadykov R., Goncharova I., Bernavskaya M. Studies of film liquid neutralization of toxic gas emissions generalization. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(4):69–74. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Absorption of gas impurities. URL: <https://msd.com.ua/processy-inzhenernoj-zashhity-okruzhayushhej-sredy/?ysclid=1669mlsz4965855379> – 09.08.2022. (In Russ.).
2. Bernavskaya M.V., Statsenko V.N. A comprehensive solution to the environmental safety problem of autonomous hydraulic structures. Remote methods, technical tools and algorithms in applied problems of environmental research. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). Separate articles (special issue)*. 2014;(12):3–12. (In Russ.).
3. Vostrikova M.A. Analysis of the efficiency of flue gas cleaning systems of vessels from impurities when using absorbers and scrubbers. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2015;(4):66–69. (In Russ.).
4. Generalov M.B., Alexandrov V.P., Alekseev V.V. Machines, and apparatus for chemical and petrochemical industries. Moscow, Mashinostroenie, 2004. 832 p. (In Russ.).
5. Grishagin V.M. Welding aerosol: education, research, localization, application: monograph. Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2011. 213 p. (In Russ.).
6. Nakoryakov V.E., Grigorieva N.I. On joint heat and mass transfer during film absorption. *Heat transfer and hydrodynamics during boiling and condensation*. Novosibirsk, ITF SO AN USSR, 1979. P. 278–284. (In Russ.).
7. Starkova A.V., Makhotkin A.F., Balyberdin A.S., Makhotkin I.A. Mechanism and kinetics of carbon dioxide chemisorption by an aqueous solution of sodium carbonate. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2011;(15):76–81. (In Russ.).
8. Statsenko V.N., Eremenko M.A., Bernavskaya M.V. Method of liquid film neutralization of toxic gas emissions. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2020;(2):88–95. (In Russ.).