

УДК 629.7.06

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ КАК СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АДСОРБЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ

А.Е. Белявский, Т.Л. Шустров

Докт. техн. наук, доц. А.Е. Белявский; Т.Л. Шустров (МАИ)

В статье представлены результаты эксперимента по повышению эффективности адсорбционной очистки при помощи предварительной каталитической фильтрации. Суть эксперимента заключается в использовании фотокатализатора как устройства, способствующего постепенной пошаговой деструкции сложных органических загрязнителей в более простые, что позволит более эффективно заполнять микро- и мезопоры адсорбента.

Ключевые слова: фотокатализ, адсорбция, система очистки газовой среды, комплект патронов очистки

Utilizing Pre-Photocatalytic Filtration to Increase Efficiency of Adsorption Filters. A.Ye. Belyavsky, T.L. Shustrov

The article shares the results of an experiment for enhancing the efficiency of the adsorption purification process with preliminary photocatalytic decomposition of impurities. The experiment was designed to study the use of a photocatalysis device to gradually break down complex organic pollutants into simpler components so that they could be effectively captured within adsorbent micropores and mesopores.

Keywords: photocatalysis, adsorption, gaseous environment purification system, purification cartridge assembly

Вопрос поддержания запланированного химического состава искусственной газовой среды любого герметичного объекта является ключевым для обеспечения его обитаемости. В случае нарушения баланса веществ, необходимых для поддержания дыхания, и загрязнителей происходит либо существенное ухудшение условий пребывания на объекте, либо объект со временем становится необитаемым. От качественного и эффективного обеспечения условий обитаемости зависит не только субъективный комфорт находящихся на объекте людей, но и успешность выполняемых ими работы [1].

Существует большое количество технологий, направленных на устранение вредных микропримесей из искусственной газовой среды. Одной из самых распространенных и надежных методик является адсорбция. В частности, адсорбция на активных углях. Факт отсутствия дипольного момента и избирательности активных углей можно расценивать как недостаток, так

и достоинство в зависимости от ситуации. Если фильтрация происходит в эмибиент-режиме (средовом), то предпочтение отдается именно углям в связи со способностью забирать из газовой среды полный спектр загрязнителей.

Адсорбция активными углями возможна благодаря большой итоговой площади поверхности, которая достигается наличием большого количества пор (макро, мезо, микро) в каждой грануле. Заполнение пор загрязнителями происходит пропорционально размерам молекул, а также мольным объемам микропримесей.

В связи с этим возникает очевидный вывод: чем меньше вещества (по габаритам и массе) вступает в контакт с гранулами активного угля, тем полнее происходит заполнение пор адсорбента, позволяющее максимально эффективно использовать его рабочую зону в связи с последовательным заполнением пор (от микро- до макро-) и максимальным использованием в процессе адсорбции не только слабого ван-дер-ваальсова взаимодействия, но и капиллярной конденсации [2, 5].

На данный момент времени система блока микропримесей (СБМП) (рис. 1) на борту российского сегмента Международной космической станции (РС МКС) состоит из адсорбционного нерегенерируемого предварительного фильтра (ФОА, фильтр очистки аминный), адсорбционных регенерируемых фильтров (ЗПЛ, защитный патрон летный), каталитических фильтров (ПКФ, патрон каталитический фильтрующий) и ПКФ-Т (высокотемпературный). Цикл между регенерациями патрона ЗПЛ составляет 20 сут. Продолжительность одной регенерации на борту составляет приблизительно 20 ч. Во время проведения эксперимента в связи с продолжительностью рабочего дня регенерация проводилась в течение двух последовательных суток.

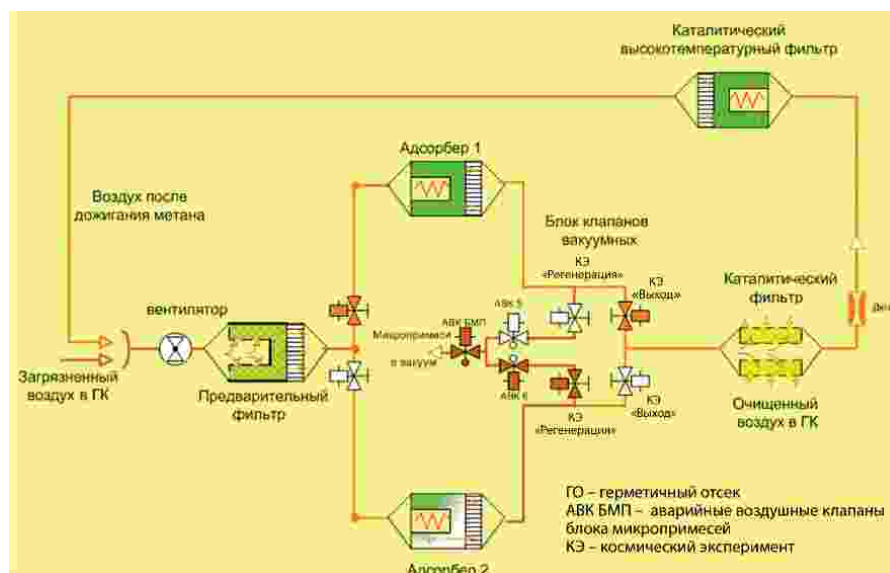


Рис. 1. Схема системы СБМП РС МКС

С учетом вышесказанного возникает вопрос: а есть ли возможность увеличить продолжительность одного цикла и эффективность очистки, предварительно «разбивая» комплексные органические загрязнители перед их попаданием на адсорбент. Для данной задачи предлагается использовать технологию фотокатализа (ФК) [3].

В основе ФК есть изменение скорости химической реакции или ее инициирование под действием ультрафиолетового, видимого или инфракрасного излучения в присутствии фотокатализатора, который вступает в химические превращения с участниками реакции в результате поглощения квантов света. Наиболее распространенным катализатором в настоящий момент является оксид титана TiO_2 , наносимый на неметаллический пористый носитель. Принцип максимизирования рабочей поверхности в катализаторах аналогичен таковому в сорбентах, поскольку фундаментально в процессе каталитических преобразований присутствует адсорбция как один из начальных этапов [4].

Важным моментом в указанном процессе для нашей задачи является то, что «превращения веществ» при катализе осуществляются поэтапно, с постепенным образованием все более и более простых соединений, по итогу достигая «нерасщепляемых» углекислого газа и воды. Данный фактор обеспечивает увеличение полноты эффективного использования адсорбционных фильтров до полного насыщения, поскольку позволяет минимизировать «свободное место» в микро- и мезопорах адсорбента.

Для проведения испытаний по предварительной деструкции вредных микропримесей для облегчения очистки газовой среды адсорбционными фильтрами собрана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 2.

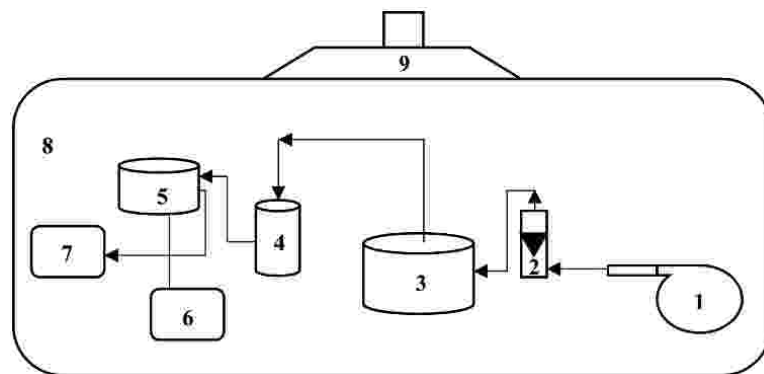


Рис. 2. Экспериментальный испытательный стенд:

1 – воздуходувка; 2 – ротаметр; 3 – бак смеситель с дозатором; 4 – фотокаталитический фильтр – собран на базе лаборатории; 5 – адсорбционный фильтр – стандартный ЗПЛ-1М2 2021 г. засыпки, произведенный для типовых испытаний; 6 – вакуумный насос (безмасляный, исключает возможность загрязнения среды эксперимента вредными микропримесями (ВМП)); 7 – газоанализатор; 8 – плексигласовый бокс (в котором был собран стенд); 9 – вытяжная вентиляция

Основной принцип эксперимента заключался в следующем: этанол (95 %) добавили через дозатор в бак-смеситель, затем осуществляли его испарение при помощи движения воздушной массы над поверхностью жидкости. Далее фиксировали время наступления проскока через адсорбционный фильтр и его величину. Точечные диаграммы фиксировали концентрацию загрязнителя в контуре либо в результате сорбционного удаления, либо в результате комбинированной очистки, с предварительным распадом молекул этанола. Температура среды равна температуре помещения 22 °С, давление равно атмосферному.

Эксперимент проводился при нескольких основных режимах:

- очистка газовой среды со сбросом ВМП за пределы контура: без ФК, с ФК;
- рециркуляционная очистка газовой среды: без ФК, с ФК.

После каждого эксперимента проводилось сквозное проветривание помещения для устранения остаточного загрязнения этанолом, а также проводилась термовакuumная регенерация адсорбционного фильтра со сбросом десорбированного загрязнителя за пределы испытательного бокса.

В качестве адсорбционного фильтра применялся патрон ЗПЛ-1М2, произведенный для типовых испытаний, с активным углем ФАС-К, аналогичные образцы которого в данный момент находятся в составе комплекта патронов очистки (КПО) на РС МКС. Для проведения фотокаталитической предварительной очистки был собран экспериментальный образец следующего вида (рис. 3).

Для проведения испытаний применялся малогабаритный фотокаталитический элемент (высота 10 см, внутренний диаметр 5 см, внешний – 6 см).

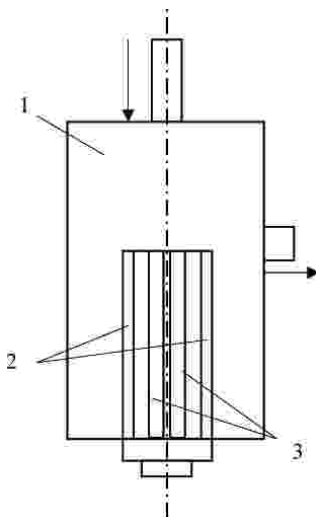


Рис. 3. Лабораторный фотокаталитический фильтр:

1 – корпус; 2 – TiO_2 -фотокатализатор на носителе; 3 – УФ-лампа

Для элемента с такими параметрами был выбран невысокий расход парогазовой смеси, равный 0,63 м³/ч, что с высокой вероятностью позволит протекать процессу ФК в более полной мере. В качестве источника УФ-излучения была использована стандартная лампа от дезинфектора воды. Как видно из изображения, воздух, поступая в очиститель, задерживается в зоне очистки в связи с конструкцией корпуса прибора, что также обеспечивает максимально полный процесс фотокаталитического окисления. Каждый цикл испытаний проводился с использованием 22 мл загрязнителя (этанола). Такой объем вещества в сочетании с невысокими расходами парогазовой смеси через рабочий контур минимизирует возможность проскока примеси через каталитический фильтр без каких-либо изменений.

В результате проведения испытаний (три на каждый режим) были получены результаты, отраженные далее в диаграммах, (показания снимались каждые 10 сек). Результаты испытаний не усреднялись, для демонстрации выбирались наиболее показательные графики. Диаграммы носят демонстративный характер в связи с обилием точек замера и ограниченным пространством страницы.

Первой группой испытаний было проведение очистки объема при сбросе прошедшей через контур парогазовой смеси за пределы бокса. Это необходимо для анализа эффективности предлагаемой конфигурации в субоптимальных условиях работы – при ФК предпочтительнее работать в режиме рециркуляции.

Целью данных тестов было уловить и зафиксировать продолжительность отсутствия проскока загрязнителя на выходе из контура. В емкость смесителя было залито 22 мл 95 % раствора этанола. Результаты испытаний представлены на рис. 4.

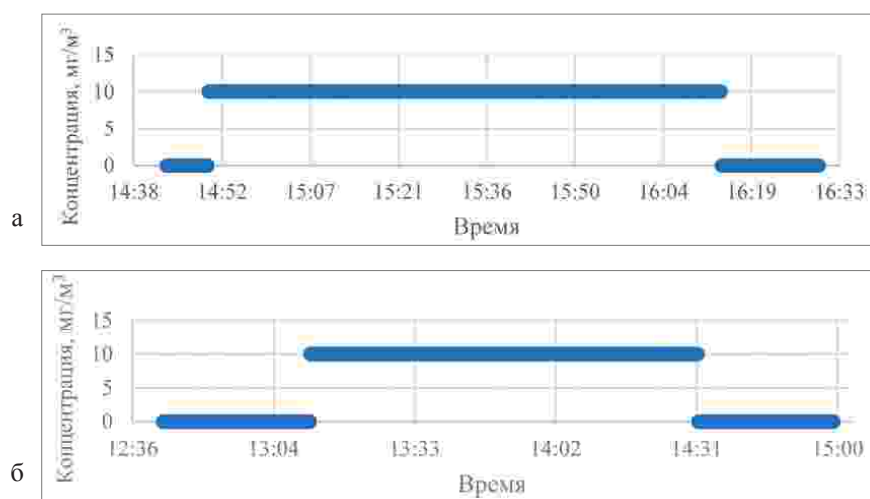


Рис 4. Результаты испытаний по очистке загрязненного воздуха:

а – только адсорбционная очистка; б – предварительная фотокаталитическая деструкция

Как видно из представленных точечных диаграмм, появление загрязнителя на выходе из контура наступает существенно позже при включении в работу предварительной каталитической фильтрации. Первый проскок загрязнителя был зафиксирован спустя 7 мин после начала эксперимента. Можно допустить, что это связано исключительно со скоростью испарения этанола при минимальном воздействии на него движущегося воздуха контура, однако на втором графике при включенном в работу фотокатализаторе, первый проскок наблюдается уже спустя 30 мин при всех тех же условиях. Продолжительность испытаний в обоих случаях составила приблизительно 2 ч.

Второй группой испытаний было проведение очистки объема от парогазовой смеси в рециркуляционном режиме, обеспечивая более полное приближение к реальному режиму работы любого оборудования систем очистки газовой среды – замкнутому герметичному объему – каким, например, является космическая станция или подземный бункер.

Целью данных тестов было уловить и зафиксировать продолжительность отсутствия проскока загрязнителя на выходе из контура, продолжительность очистки и максимальную концентрацию загрязнителя на выходе. В емкость смесителя было залито 22 мл 95 % раствора этанола. Результаты испытаний представлены на рис. 5.

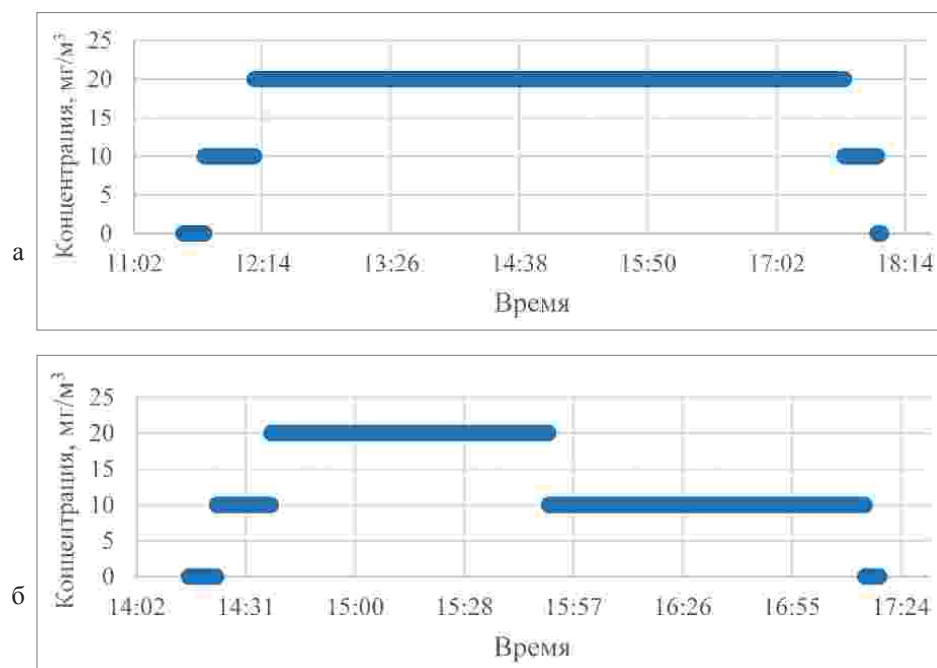


Рис 5. Результаты испытаний по очистке загрязненного воздуха в рециркуляционном режиме:

а – только адсорбционная очистка; *б* – предварительная фотокаталитическая деструкция

С учетом изменения режима проведения эксперимента на циклический, мы продемонстрировали преимущества предварительной деструкции органических загрязнителей перед их попаданием в адсорбирующий фильтр. И хотя время достижения проскока (приблизительно 12 мин в обоих случаях) оказалось фактически идентичным, аналогично со временем достижения стабильной предельной концентрации в течение эксперимента (37–40 мин), комбинированная очистка не только быстрее преодолела «плато» максимальной концентрации, но и по итогу существенно быстрее справилась с очисткой контура, достигнув стабильного нуля по показаниям датчиков. Итоговое зафиксированное время «от нуля до нуля» адсорбционной очистки составило 6 ч 18 мин, при том, что комбинированная очистка была завершена за 3 ч 09 мин.

Выводы

1. Предварительная деструкция органических загрязнителей на фотокатализаторе приводит к более быстрой очистке (3 ч против 6) газовой среды адсорбционными фильтрами в закрытом режиме.

2. Предварительная деструкция органических загрязнителей приводит к увеличению «времени до проскока» (7 мин против 30) при работе в открытом режиме.

3. Существенное улучшение очистки парогазовой смеси от микропримесей адсорбционными фильтрами достигается использованием небольшого по габаритам (высота фотокаталитического элемента – 10 см; внешний диаметр – 6 см; объем внешнего чехла – 2,7 л) и массе (самого прибора – 127 г, чехла – 500 г) фотокаталитического предфильтра, даже без использования специализированных светодиодов.

Полученные данные будут использованы при дальнейших работах по модернизации облика КПО СБМП для пилотируемых объектов, а также при создании имитаторов очистки газовой среды адсорбционными и ФК-методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перспективы развития регенерационных систем жизнеобеспечения для длительных пилотируемых космических полетов: предварительный анализ / Л.С. Бобе, Л.И. Гаврилов, Э.А. Курмазенко // Вестник Московского авиационного института. – 2008. – Т. 15, № 1. – С. 17–24.
2. Шумяцкий, Ю.И. Адсорбция: процесс с неограниченными возможностями / Ю.И. Шумяцкий, Ю.М. Афанасьев. – Москва: Высшая школа, 1998. – 78 с. – ISBN 5-06-003470-4.
3. Фотокаталитическая система обеззараживания и очистки атмосферы обитаемых модулей космических аппаратов от микропримесей / Э.А. Курмазенко, Д.Г. Громов, А.Е. Коробков, А.А. Кочетков [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2016. – № 3(20). – С. 88–100.

4. Артемьев, Ю.М. Введение в гетерогенный фотокатализ / Ю.М. Артемьев, В.К. Рябчук. – Санкт-Петербург: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 1999. – 304 с.
5. Trace Contaminant Dynamics Simulation Model for TCRS Design Concept / E.A. Kurmazenko, N.M. Samsonov, L.I. Gavrilov, N.S. Farafonov [и др.] // SAE Technical Papers. – 2005. – No 2005-01-2861. – 12 p.

REFERENCES

1. Bobe, L.S. Prospects for the Development of Regenerative Life Support Systems for Long-Duration Manned Spaceflights: Preliminary Analysis / L.S. Bobe, L.I. Gavrilov, E.A. Kurmazenko // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. – 2008. – Vol. 15, No 1. – P. 17–24.
2. Shumyatsky, Yu.I. Adsorption: a Process With Unlimited Possibilities / Yu.I. Shumyatsky, Yu. M. Afanasyev. – Moscow: Vysshaya Shkola, 1998. – 78 p. – ISBN 5-06-003470-4.
3. Photocatalytic System for Disinfection of the Atmosphere and Its Purification from Trace Contaminants in Spacecraft Pressurized Modules / E.A. Kurmazenko, D.G. Gromov, A.E. Korobkov, A.A. Kochetkov [et al.] // Manned Spaceflight. – 2016. – No 3(20). – P. 88–100.
4. Artemyev, Yu.M. Introduction to Heterogeneous Photocatalysis / Yu.M. Artemyev, V.K. Ryabchuk. – St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg University, 1999. – 304 p.
5. Trace Contaminant Dynamics Simulation Model for TCRS Design Concept / E.A. Kurmazenko, N.M. Samsonov, L.I. Gavrilov [et al.] // SAE Technical Papers. – 2005. – No 2005-01-2861. – 12 p.