

ПАМЯТИ АКАДЕМИКА В.В. ЛУНИНА:  
ИЗБРАННЫЕ РАБОТЫ УЧЕНИКОВ И КОЛЛЕГ

УДК 546

КАТАЛИТИЧЕСКАЯ ДЕСТРУКЦИЯ ОЗОНА В ГАЗОВЫХ СИСТЕМАХ  
ДЕТЕКТОРНЫХ УСТАНОВОК УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

© 2021 г. С. Н. Ткаченко<sup>a,b</sup>, И. С. Ткаченко<sup>a,b,\*</sup>, В. А. Крамаренко<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Химический факультет, Москва, Россия

<sup>b</sup> ООО НВФ “ТИМИС”, Москва, Россия

<sup>c</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

\* e-mail: timis@timis.ru

Поступила в редакцию 24.08.2020 г.

После доработки 02.09.2020 г.

Принята к публикации 10.09.2020 г.

Представлены физико-химические расчеты необходимого количества катализатора разложения озона гоппалюм марки ГТТ, перепада давления на его слое в условиях работы газовых систем ускорителей заряженных частиц. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными на примере данных, полученных в газовой системе детекторной установки ATLAS Большого адронного коллайдера. Полученные физико-химические данные позволяют оптимизировать параметры деструкторов – фильтров озона и количество катализатора, необходимого для очистки от озона газовых смесей в детекторных установках ускорителей заряженных частиц.

*Ключевые слова:* катализатор гоппалюм, разложение озона, перепад давления на слое катализатора, деструкторы – фильтры озона, дрейфовый детектор, ускоритель заряженных частиц

DOI: 10.31857/S0044453721030225

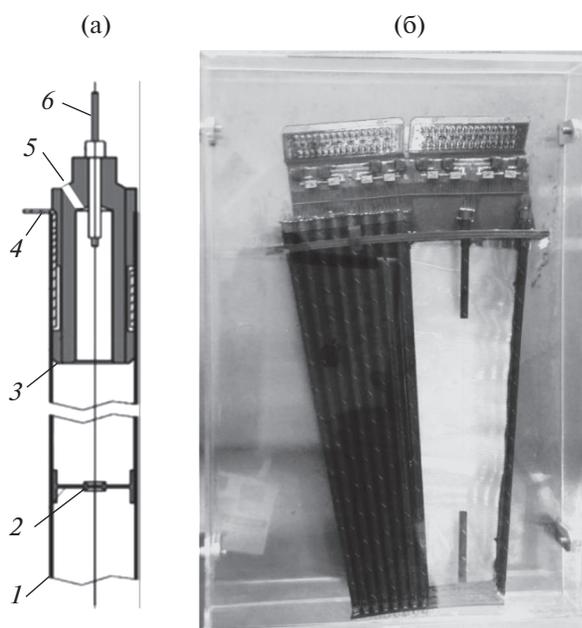
Ускоритель заряженных частиц [1] – класс устройств для получения заряженных элементарных частиц и ионов высоких энергий. К примеру, Большой адронный коллайдер (БАК или LHC) Европейского центра ядерных исследований является самой крупной экспериментальной установкой в мире, где в декабре 2013 экспериментально доказано существование новой элементарной частицы – Бозона Хиггса. В БАК пучки частиц ускоряются в противоположных направлениях и сталкиваются в специальных точках, которые контролируются регистрирующими установками. Одна из них – ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus). В установку входят различные типы детекторов [2]. Внутренний детектор установки ATLAS, служит для регистрации координат вторичных частиц, которые образуются в результате столкновений встречных пучков протонов и ядер. Внутренний детектор состоит из пиксельных и стриповых кремниевых многоканальных детекторов (SCT), а также газовых пропорциональных дрейфовых трубок – Transition Radiation Tracker (TRT).

ДЕТЕКТОР TRT И РОЛЬ ОЗОНА  
В ЕГО РАБОТЕ

Газовые пропорциональные детекторы, работающие в дрейфовом режиме, с помощью специ-

альной электроники позволяют регистрировать факт прохождения заряженных частиц и, дополнительно, измерять координаты частиц по времени задержки прихода сигнала. В основе принципа работы пропорционального счетчика лежит процесс лавинного усиления заряда в цилиндрическом электрическом поле [3]. Детектор TRT состоит из 300 000 дрейфовых трубок – “соломинок” (straw) [4–7], представляющих собой тонкостенные трубки, 0.004 м в диаметре и 1.5 м длиной. Внутренняя поверхность трубок покрыта проводящим слоем графита и служит катодом. Каждая трубка заполнена газовой смесью, которая ионизируется при прохождении заряженной частицы.

В дрейфовых детекторах TRT установки ATLAS выбрана газовая смесь на основе аргона (70%) и диоксида углерода (27%). Однако, в детекторах с таким газовым наполнением, в условиях уникально большой светимости БАК, не удается достичь устойчивого пропорционального газового усиления без электрических пробоев. Чтобы добиться стабильной работы детектора без электрических разрядов, выбрана дополнительная 3% электроотрицательная добавка кислорода к газовой смеси. Применение этой смеси позволило достичь стабильной работы детектора в течение



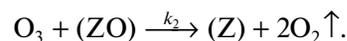
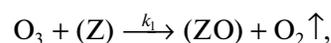
**Рис. 1.** а) схема устройства дрейфовой трубки: 1 – тонкостенная пластмассовая трубка с внутренним проводящим покрытием, 2 – держатель из поликарбоната, центрирующий положение проволочки-анода, 3 – концевая втулка из поликарбоната, 4 – кольцевая пружина и катодный вывод, 5 – газовый канал, 6 – обжимной контакт анодной проволоки; б) фотография макета сборки нескольких дрейфовых трубок для лабораторной установки.

длительного времени эксплуатации детектора, с 2008 года по настоящее время.

Однако, под действием ударной ионизации в лавине заряженных частиц у анода детектора из кислорода образуется озон. В лабораторных условиях, на тестовом стенде [8], концентрация озона в газовой смеси детектора TRT плавно нарастала до 120 ppb. Озон является достаточно стабильным, весьма коррозионно-активным и токсичным веществом. Согласно ГОСТ 12.1.007-76 [9] предельно допустимая концентрация (ПДК) озона в воздухе рабочей зоны составляет 0.1 мг/м<sup>3</sup>, что соответствует 0.05 ppb. Он разрушает конструкционные материалы детектора и газовой системы и является опасным для здоровья обслуживающего персонала. В частности, при разработке и исследовании газовой системы детектора TRT обнаружены дефекты от воздействия озона в газовых подводных трубках детектора. Эти дефекты с течением времени вызвали разрушение пластмассовых соединений газовой системы, нарушение герметичности и выход из строя дрейфовых трубок. Поэтому в такого рода газовых системах [5–8, 10] для разложения озона необходимо применять фильтры со специальным каталитическим материалом. Схема устройства отдельной трубки и фотография макета сборки дрейфовых

трубок для лабораторных испытаний представлены на рис. 1.

**Разложение озона.** Наиболее вероятным считают механизм разложения озона, состоящий из двух последовательных стадий, удовлетворяющих уравнению первого порядка по концентрации озона [11]:



Специальным каталитическим материалом для разложения озона в газовой системе БАК служит катализатор гопталюм марки ГТТ, который входит в число высокоэффективных катализаторов двойного назначения [12, 13].

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И МЕТОДИКИ РАСЧЕТОВ

Расчетно-экспериментальные исследования заключались в определении количества и высоты защитного слоя, а также перепада давления (сопротивления) на слое катализатора гопталюм марки ГТТ на основе оксидов марганца, меди, никеля и высокоглиноземистого цемента-талюма, необходимого для эффективного разложения озона в газовой системе детектора TRT установки ATLAS БАК. На основе полученных данных спрогнозирована работа каталитического деструктора при увеличении мощности ускорителя после планируемой модернизации.

**Метод 1.** Газовая система детектора TRT установки ATLAS БАК [8, 14, 15] состоит из нескольких подсистем, которые схематически изображены на рис. 2. Насыпной объем катализатора гопталюм марки ГТТ составляет 0.005 м<sup>3</sup>. Фильтры находятся вне зоны облучения, газовая смесь практически не содержит паров воды. Управление очисткой газов осуществляется в автоматическом режиме.

Измерения концентрации озона в реальной газовой системе сделаны после пуска установки ATLAS и достижения рабочей интенсивности пучков Большого адронного коллайдера энергии 4 ТэВ. При этом уровень величины светимости БАК составлял 2885 мкбар<sup>-1</sup> с<sup>-1</sup>, ионизационный ток в модуле барреля TRT [14] достигал 20 нА на 0.01 метра длины отдельной трубки TRT. Газовая смесь в различных экспериментах представлена следующими составами, или 70% аргона (Ar) – 27% углекислого газа (CO<sub>2</sub>) – 3% кислорода (O<sub>2</sub>), или 70% ксенона (Xe) – 27% углекислого газа (CO<sub>2</sub>) – 3% кислорода (O<sub>2</sub>).

Для выяснения динамики накопления озона в газовой системе БАК измерялась его концентрация во времени. Измерения озона проводились непосредственно после выхода газовой смеси из

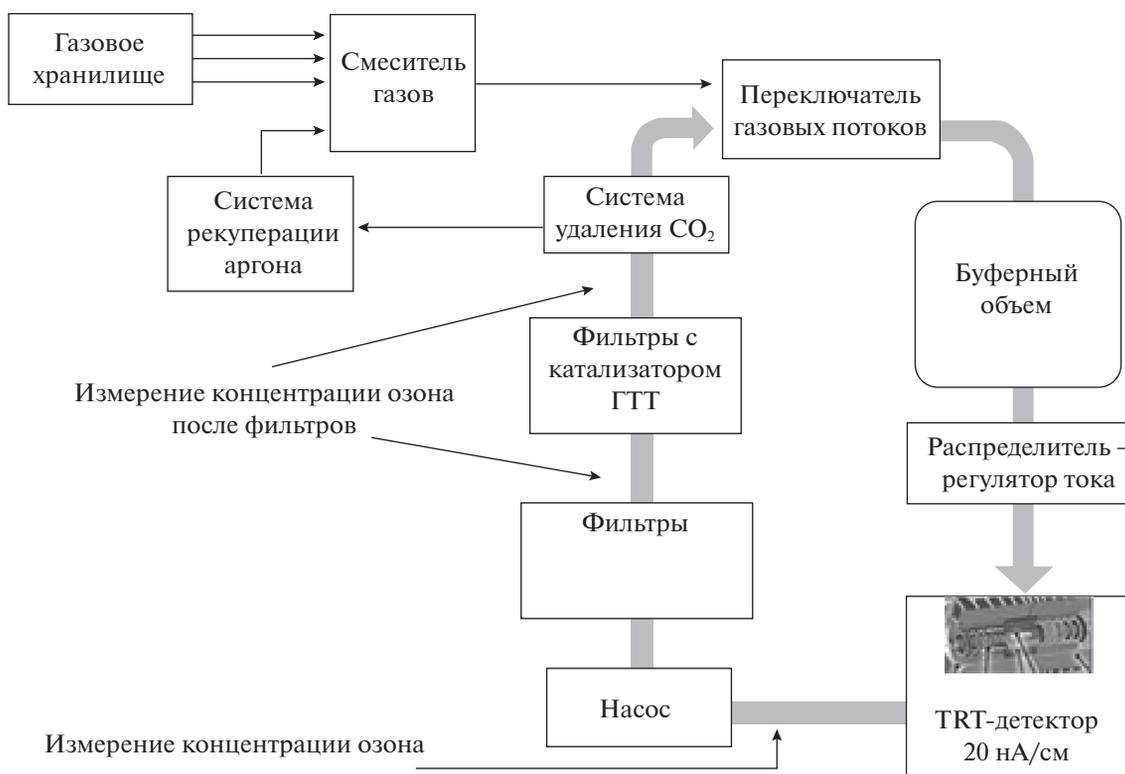


Рис. 2. Схема устройства газовой системы детектора TRT установки ATLAS на встречных пучках БАК.

детектора во время работы БАК на встречных пучках, а также до и после деструктора. Измерения проводились озонметром 106М [16] с диапазоном измерений от 0 до 1000 ppт и погрешностью – 0.01 ppт. Поток газа, отбираемый из системы для измерения озона составлял  $0.0005 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Давление измерялось датчиками “A Lame Acier” [17], погрешность 0.01 бар ( $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$ ). Температура и расход газа измерялись датчиками фирмы “Krohne” [18]. Погрешность приборов в измерении температуры  $0.1^\circ\text{C}$ , а в измерении расхода  $0.1$  нормальных  $\text{м}^3/\text{ч}$ . В системе осуществлялась циркуляция газа по замкнутому контуру с потоком  $3.9$  нормальных  $\text{м}^3/\text{ч}$  ( $\text{нм}^3/\text{ч}$ ). Температура составляла  $28.7^\circ\text{C}$ , а давление в деструкторе озона было близко к атмосферному.

**Метод 2.** Разложение озона на катализаторе гопталоу марки ГТТ исследовалось на лабораторной проточной каталитической установке в МГУ имени М.В. Ломоносова. Получены кинетические кривые, называемые ознограммами [8]. Получена зависимость степени превращения (деструкции) озона в зависимости от времени контакта газовой смеси с катализатором для определения эффективной константы скорости процесса разложения озона. В реактор лабораторной установки загружались навески катализатора гопталоу марки ГТТ различной массы – от

$0.018$  до  $0.066 \text{ кг}$ . Взвешивание образцов производилось на электронных аналитических весах “DEMCOM” с точностью  $0.0001 \text{ кг}$ . Эксперименты проводены в сухом потоке газовой смеси при температуре  $28.0^\circ\text{C}$ . Величина расхода газа через реактор составляла  $0.025 \text{ м}^3/\text{мин}$ , что соответствует линейной скорости в лабораторном реакторе  $u_v = 0.30 \text{ м/с}$ . Радиус лабораторного реактора составлял  $0.021 \text{ м}$ . Концентрация озона на входе в реактор –  $2.4 \text{ г/м}^3$ . Время контакта вычислялось по формуле:

$$\tau = 60m\varepsilon/u_v,$$

где  $m$  – масса навески образца, г;  $\varepsilon$  – порозность слоя катализатора;  $u_v$  – расход потока газа через реактор, м/с.

Перепад давления на слое катализатора на лабораторном стенде измерялся с помощью дифференциального манометра “РАСКО” с максимальной шкалой измерения  $40 \text{ кПа}$  и минимальной ценой деления  $1 \text{ кПа}$ . Погрешность дифференциального манометра составляла  $500 \text{ Па}$ .

Полученные исходные параметры и зависимости для дальнейших расчетов для катализатора гопталоу марки ГТТ интерпретировались, исходя из модели проточного реактора в режиме идеального вытеснения и литературных данных [11] о том, что реакция разложения озона в сухом газе

**Таблица 1.** Обозначения и формулы расчета средне-статистических параметров катализатора гоппалюм марки ГТТ в виде экструдатов

Параметр	Обозначение и расчетная формула
Диаметр гранулы катализатора, м	$d'$
Высота гранулы катализатора, м	$H$
Объем одной гранулы катализатора с усредненными размерами, м <sup>3</sup>	$V' = \pi d'^2 H / 4$
Поверхность одной гранулы катализатора с усредненными размерами, м <sup>2</sup>	$S' = \pi r'^2 2 + 2\pi r' H$
Удельная поверхность одной гранулы катализатора с усредненными размерами [21], м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	$a_0 = S' / V'$
Масса одного экструдата, кг	$m'$
Плотность кажущаяся катализатора, кг/м <sup>3</sup>	$\rho_T = m' / V'$
Плотность насыпная катализатора $\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup>	$m_{\text{слоя}} / V_{\text{слоя}}$
Порозность слоя катализатора [21]	$\varepsilon = 1 - (\rho_n / \rho_T)$
Удельная внешняя геометрическая видимая поверхность слоя катализатора, отнесенная к кубическому метру гранул [21]*, м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	$a = a_0(1 - \varepsilon)$
Удельная внешняя геометрическая видимая поверхность гранул катализатора, отнесенная к массе**, м <sup>2</sup> /кг	$S_{\text{уд}} = a / \rho_n$
Эквивалентный диаметр [20] для зернистого слоя катализатора, м	$d_3 = 4\varepsilon / a$

\* Параметр необходим для методики расчета перепада давления на насыпном слое катализатора.

\*\* Параметр необходим для методики расчета необходимого количества катализатора разложения озона.

подчиняется кинетическому уравнению первого порядка.

**Методика расчета высоты защитного насыпного слоя катализатора.** На основе входной  $C_0$  и выходной  $C$  концентраций озона, а также величины времени контакта  $\tau$  на лабораторной проточной каталитической установке в МГУ имени М.В. Ломоносова определялась эффективная константа скорости реакции разложения озона по формуле:

$$k_3 = \frac{1}{\tau} \ln \left( \frac{C_0}{C} \right). \quad (1)$$

Зная константу скорости реакции, можно оценить высоту защитного слоя катализатора, необходимую для достижения заданной выходной концентрации озона. Так как объем слоя катализатора  $V_{\text{слоя}} = \tau u_v / \rho_\varepsilon$ , и высота цилиндрического

слоя катализатора  $h = \frac{4}{\pi d^2} V_{\text{слоя}}$ , то оценочная минимальная высота защитного слоя:

$$h' = \frac{4}{d^2} \frac{1}{\varepsilon k_3} \ln \left( \frac{C_0}{C} \right) u_v, \quad (2)$$

где  $d$  – диаметр реактора, м;  $k_3$  – эффективная константа скорости разложения озона на катализаторе, с<sup>-1</sup>;  $u_v$  – расход потока газа через реактор м<sup>3</sup>/с;  $\varepsilon = 1 - (\rho_n / \rho_T)$ , ( $\rho_n, \rho_T$  – см. табл. 1). Полученные данные позволили выдать предварительные рекомендации по габаритам макета деструктора озона.

**Методика расчета количества катализатора.** Расчет необходимого количества катализатора для разложения озона проводился на основе формулы, изложенной в монографии [19]:

$$S = \frac{4w}{\gamma v_t} \ln \frac{C_0}{C}, \quad (3)$$

где  $C_0$  – концентрация озона на входе в реактор, г/м<sup>3</sup> или ppm;  $C$  – концентрация озона на выходе из реактора, г/м<sup>3</sup> или ppm;  $w$  – объемная скорость потока газа через реактор, м<sup>3</sup>/с;  $v_t$  – средняя скорость теплового движения молекул озона, м/с;  $S$  – внешняя геометрическая поверхность всех гранул образца катализатора, м<sup>2</sup>;  $\gamma$  – коэффициент активности катализатора в реакции разложения озона.

**Методика расчета перепада давления на насыпном слое катализатора.** Расчет перепада давления на насыпном слое катализатора на единицу длины в турбулентном режиме для катализатора в форме экструдатов проводился [20] по формуле (4).

$$\Delta p / L = \xi_0 u^2 \rho_{\text{смеси}} a / (8\varepsilon^3), \quad (4)$$

где  $\Delta p / L$  – перепад давления на единицу длины, Па/м;  $G$  – массовый расход газа, кг/ч;  $\rho_{\text{смеси}}$  – плотность смеси газов при заданных температуре и давлении, кг/м<sup>3</sup>;  $a$  – насыпная поверхность гранул зернистого слоя, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $u = w / S_d = G / (\rho_{\text{смеси}} S_d)$  – средняя линейная скорость, м/с, где  $S_d$  – полное сечение реактора (сечение без катализатора), м<sup>2</sup>, а  $w$  – не приведенный к нормальным условиям объемный расход газа в деструкторе, м<sup>3</sup>/с;  $u_\varepsilon = u / \varepsilon$  – истинная средняя линейная скорость, м/с [21];  $Re_\varepsilon = u_\varepsilon d_3 \rho_{\text{смеси}} / \mu = (u / \varepsilon) d_3 \rho_{\text{смеси}} / \mu$  – эквивалентный критерий Рейнольдса [22];  $d_3$  – эквивалентный диаметр для зернистого слоя, м;  $\mu$  – динамическая вязкость смеси газов, кг/(м·с) или Па·с;  $\varepsilon$  – порозность зернистого слоя.

Эффективный коэффициент сопротивления  $\xi_0$  определялся [20] по формуле:

$$\xi_0 = 133 / Re_\varepsilon + 2.34. \quad (5)$$

Среднестатистические параметры катализатора гопталоум марки ГТТ в виде экструдатов, необходимые для расчетов, приведены в табл. 1.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно табл. 1 рассчитаны и измерены среднестатистические параметры катализатора гопталоум марки ГТТ в виде экструдатов, используемые в газовой системе детектора TRT установки ATLAS БАК и необходимые для расчета деструктора озона. Они представлены в табл. 2.

Условия работы газовой системы детектора TRT установки ATLAS БАК определялись согласно методу 1. Измерения показали, что после двух часов работы коллайдера на встречных пучках концентрация озона на выходе из детектора TRT установки ATLAS БАК перестала меняться и достигла стационарного значения 40 ppm, что в 800 раз выше предельно допустимой концентрации. Основные исходные экспериментальные параметры газовой системы детектора TRT установки ATLAS БАК, необходимые для расчетов, измеренные согласно методу 1, приведены в табл. 3.

На экспериментальной лабораторной установке на химическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова, согласно методу 2, получена зависимость степени разложения озона от времени контакта озона с катализатором гопталоум марки ГТТ в сухой газовой смеси. Эффективная константа скорости разложения озона, определенная из этих данных, составила  $k_3, \text{с}^{-1} = 58.4 \pm 9.9$ .

На основе измеренных на лабораторной установке данных произведен оценочный, предварительный расчет высоты защитного слоя катализатора для деструкции озона. Минимальная теоретически рассчитанная высота защитного слоя катализатора согласно формуле (2) на основе параметров табл. 3 составила  $h', \text{м} \approx 0.1 \pm 0.02 \text{ м}$ .

Затем произведены расчеты минимального количества катализатора и перепада давления (сопротивления) на слое катализатора в заданных условиях газовой системы детектора TRT установки ATLAS БАК согласно указанным выше расчетным методикам.

Расчет минимально необходимого количества катализатора проводился по формуле (3). Тепловая скорость движения озона в газе определялась как  $v_t = \sqrt{3kT/m}$ , где  $T$  – температура, К;  $k$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  $m$  – масса озона, кг. Согласно расчету в указанных выше условиях,  $v_t \approx 3.5 \times 10^2, \text{м/с}$ . Максимальная видимая геометрическая суммарная площадь поверхности всех гранул катализатора в деструкторе, необходимая для осуществления реакции разложения озона до заданных значений, составила:

**Таблица 2.** Рассчитанные и измеренные среднестатистические параметры катализатора гопталоум марки ГТТ в виде экструдатов

Параметр	Величина	Параметр	Величина
$d', \text{м}$	0.002	$\rho_T, \text{кг/м}^3$	1576
$H, \text{м}$	0.01	$\rho_H, \text{кг/м}^3$	1090
$V', \text{м}^3$	0.000000314	$\epsilon$	0.31
$S', \text{м}^2$	0.00006908	$a, \text{м}^2/\text{м}^3$	1518
$a_0, \text{м}^2/\text{м}^3$	2200	$S_{\text{уд}}, \text{м}^2/\text{кг}$	1.39
$m', \text{кг}$	0.00004948	$d_э, \text{м}$	0.00131

**Таблица 3.** Исходные экспериментально полученные параметры газовой системы детекторов TRT БАК

$C_0, \text{ppm}$	$C, \text{ppm}$	$w, \text{нм}^3/\text{ч}$	$t, \text{°C}$	$\gamma^*$
40	0.050	3.9	28.7	$1.1 \times 10^{-4}$

\* Согласно паспорту качества на катализатор гопталоум [23].

$$S = \frac{4 \times 1.1 \times 10^{-3} (\text{м}^3/\text{с})}{1.1 \times 10^{-4} \times 3.5 \times 10^2 (\text{м/с})} \times \ln \frac{40 (\text{ppm})}{0.050 (\text{ppm})} \approx 0.72 \text{ м}^2.$$

Рассчитанная масса катализатора:

$$m' = S/S_{\text{уд}} \approx 0.5 \pm 0.05 \text{ кг}.$$

С учетом сохранения ресурса работоспособности катализатора в течение 10 лет и предполагаемого в будущие периоды значительного увеличения интенсивности пучков после модернизации БАК и, соответственно, концентрации озона и расхода газовой смеси в газовой системе детектора TRT коэффициент запаса массы катализатора в деструкторе принят равным 11. Тогда масса насыпного слоя катализатора  $m = 5.5 \text{ кг}$ , а объем:

$$V_H = m/\rho_H = 0.00505 \text{ м}^3.$$

Таким образом в деструктор озона необходимо разместить около  $0.005 \text{ м}^3$  катализатора гопталоум марки ГТТ.

Для равномерного течения газа в химических реакторах со стационарным зернистым слоем выполняется следующее соотношение [21]:

$$0.22 \leq u\sqrt{\rho_{\text{смеси}}} \leq 0.44. \quad (6)$$

Необходимо учитывать, что детектор TRT должен работать, используя два разных вышеуказанных состава газа, имеющих разную плотность. Поэтому для выполнения соотношения (6) для обоих составов при атмосферном давлении, можно принять значение  $u\sqrt{\rho_{\text{смеси}}}$  близкое к 0.440. Например, для смеси состава 70% Xe – 27% CO<sub>2</sub> –

**Таблица 4.** Параметры для расчета сопротивления слоя катализатора гоппалюм марки ГТТ

$w$ , нм <sup>3</sup> /ч	$T$ , К	$p$ , бар	$\rho_{\text{смеси}}^{**}$ , кг/м <sup>3</sup>	$G$ , кг/ч	$\mu^*$ , кг/(м с)	$\epsilon$	$a$ , м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	$u$ , м/с
3.90	301.7	1	1.53	5.97	$2.03 \times 10^{-5}$	0.31	1518	0.2

\* Значение из [24].

\*\* При 1 бар.

3% O<sub>2</sub> можно выбрать значение 0.408. В этом случае для режима работы деструктора с равномерным течением газа диапазон запаса  $u\sqrt{\rho_{\text{смеси}}}$  равен 0.032, а линейная скорость будет близка к максимально возможной и составит 0.2 м/с. В случае переключения работы детектора TRT на газовую смесь 70% Ar – 27% CO<sub>2</sub> – 3% O<sub>2</sub> для этой же линейной скорости при плотности смеси в указанных условиях 1.53 кг/м<sup>3</sup> величина  $u\sqrt{\rho}$  составит 0.246. Таким образом в деструкторе озона при линейной скорости газа 0.2 м/с соблюдается режим равномерного течения газа для обеих смесей.

Так как при комнатной температуре и давлении в системе близком к атмосферному не приведенный к нормальным условиям объемный расход газа составлял  $Q = 3.9 \text{ м}^3/\text{ч} = 0.00108 \text{ м}^3/\text{с}$ , то при линейной скорости  $u = 0.2 \text{ м/с}$  площадь сечения деструктора равна  $S_d = Q/u = 0.00542 \text{ м}^2$ . Соответственно диаметр сечения рабочего объема деструктора озона составит  $d = 0.083 \text{ м}$ . Следовательно, при объеме катализатора в деструкторе 0.005 м<sup>3</sup>, высота насыпного слоя определяется как  $h' = V_n/S_d \approx 1 \text{ м}$ .

При диаметре деструктора озона 0.083 м, определенном из условия равномерного течения газа, рассчитанная с учетом длительного ресурса работы катализатора гоппалюм марки ГТТ высота насыпного слоя 1 м существенно больше рассчитанной минимальной высоты защитного слоя катализатора 0.1 м. Это гарантирует снижение концентрации озона в газовой системе детектора TRT установки ATLAS БАК до допустимых значений в течение ресурсного времени эксплуатации.

Для стабильной работы газовой системы ускорителей желательнее, чтобы перепад давления на деструкторе не превышал 10 кПа. Расчет перепада давления (сопротивления) слоя катализатора гоппалюм в заданных условиях, а также с учетом определенной выше необходимой массы катализатора и геометрических размеров деструктора произведен с использованием следующих параметров, табл. 4.

Сопротивление слоя катализатора при заданных параметрах газовой смеси по рассчитанное по формуле (4)  $\Delta p/L \approx 1722 \text{ Па/м}$ , где эквивалентный критерий Рейнольдса [22]  $Re_3 \approx 63.69$  и  $\xi_0 =$

$= 4.43$ . Погрешность около 20%. Таким образом, рассчитанный перепад давления при указанных выше размерах деструктора озона не превышает 10 кПа.

Измеренный на экспериментальной лабораторной установке перепад давления в заданных условиях составил  $2000 \pm 500 \text{ Па/м}$  и подтвердил расчетные данные. При работе деструктора озона в газовых системах ускорителей с давлением, отличающимся от атмосферного, и температурой отличной от комнатной требуется перерасчет сопротивления с поправкой на необходимое давление, температуру и плотность газовой смеси.

После установки деструкторов озона в газовой системе в 2008 г. по настоящее время концентрация озона периодически измеряется на выходе из дрейфового детектора TRT установки ATLAS БАК, а также до и после деструктора озона. На входе в каталитический деструктор стационарная концентрация озона составляла от 40 до 120 ppb. На выходе из деструктора – 30–35 ppb, что с учетом погрешности озонометра 106М практически равно нулю.

Светимость новых и модернизируемых ускорителей заряженных частиц постоянно увеличивается. В частности, к 2028 году после модернизации ожидается увеличение светимости БАК более чем в 10 раз от уровня 2020 года [25]. Концентрация озона также значительно увеличится. Например, при входной концентрации озона до 1000 ppb и аналогичном расходе газовой смеси в деструкторе необходимое количество катализатора гоппалюм [26], согласно формуле (3), увеличится до 0.8 кг для полного разложения озона. Также необходимо учитывать возможное увеличение расхода газовой смеси при модернизации ускорителей, в этом случае требуемое количество катализатора для разложения озона увеличивается пропорционально. Надежная эксплуатация деструктора озона с катализатором ГТТ в течение 12 лет в условиях газовой системы детектора TRT установки ATLAS БАК показало, что при проектировании деструкторов озона коэффициент запаса количества катализатора составляющий 10–11 от рассчитанного теоретически согласно формуле (3) оправдан.

Таким образом установленные на основе теоретических расчетов и лабораторных исследований геометрические размеры насыпного слоя деструктора озона (диаметр  $d = 0.083 \text{ м}$ , высота  $h' = 1 \text{ м}$ ) и необходимое количество катализатора равно 0.005 м<sup>3</sup>, подтверждены и эффективны в реальных условиях работы системы детектора TRT установки ATLAS БАК.

Таким образом, физико-химические расчеты необходимого количества катализатора разложения озона гоппалюм марки ГТТ, высоты его защитного слоя, перепада давления на слое катали-

затора в условиях работы газовых систем ускорителей заряженных частиц подтверждены экспериментальными результатами на примере данных, полученных в газовой системе дрейфового детектора TRT установки ATLAS Большого адронного коллайдера. Каталитическая деструкция озона на катализаторе гоппалюм марки ГТТ является эффективным способом его удаления в газовых системах детекторных установок ускорителей заряженных частиц. Катализатор гоппалюм марки ГТТ успешно предотвращает повреждение озоном дрейфовых детекторов, практически полностью разлагая озон в их газовых системах. Полученные физико-химические данные дали возможность оптимизировать параметры деструкторов – фильтров озона и количество катализатора, необходимого для очистки от озона газовых смесей в детекторных установках ускорителей заряженных частиц. Предложенный расчетно-экспериментальный метод позволяет спрогнозировать характеристики деструкторов с катализатором гоппалюм марки ГТТ для эффективного разложения озона в газовых системах детекторов ускорителей заряженных частиц. Исследования катализаторов типа гоппалюм продолжаются в рамках госзадания “Физикохимия поверхности, адсорбция и катализ”.

Авторы благодарны академику РАН Валерию Васильевичу Лунину за помощь в постановке задач настоящей работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aad G., Abbott B., Abdallah J. et al.* (ATLAS Collaboration)// JINST. 2008. V. 3. S08003. 1–407 P.
2. *Маевский А.С.* Прецизионные измерения характеристик  $B(s)$  – мезонов и их распадов в эксперименте ATLAS: Дисс. канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2016. 108 с.
3. *Sauli F.* Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers// 1977. CERN.77-09. 92 P.
4. *Klyukhin V., Bashindjagian G.L., Basiladze S.G. et al.* ATLAS Technical Proposal for a General-Purpose pp Experiment at the Large Hadron Collider at CERN// CERN. Geneva. 1994. 271 P.
5. *Grishkevich Y., Kramarenko V.A., Larichev A. et al.* (ATLAS TRT Collaboration)// Nucl. Instr. and Meth. in Phys. 2000. A. 449. P. 446.
6. *Abat E., Addy T.N., Akesson T.P. et al.* (ATLAS Collaboration) //JINST. 2008. V.3. P02013.
7. ATLAS Collaboration//CERN-OPEN-2008-020. December. 2008. 1803 P.
8. *Ткаченко С.Н., Крамаренко В.А., Ткаченко И.С.* // 34 Всерос. конф. и семинара “Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии”. М.: МАКС Пресс. 2016. С. 210.
9. ГОСТ 12.1.007-76. М: Стандартиформ. 2007
10. *Маевский А.С., Болдырев А.С., Крамаренко В.А. и др.* // Тез. докл. Ломоносовские чтения. 2014. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова.
11. *Голодец Г.И.* Гетерогенно-каталитические реакции с участием молекулярного кислорода. К.: Наукова думка, 1977. 360 с.
12. *Голосман Е.З., Дульнев А.В., Ефремов В.Н. и др.* // Катализ в промышленности. 2017. Т. 17. № 6. С. 487.
13. Распоряжение Правительства РФ от 25 октября 2017 г. № 2345 п. 3. О присуждении премий Правительства Российской Федерации 2017 года в области науки и техники. URL: <http://static.government.ru/media/files/coXqzDhA3vq4TVVtmgm4xBg-Yltf4mCwN.pdf>
14. ATLAS Collaboration. Inner Detector Technical Design Report. V. I & II// CERN/LHCC/97-16 & CERN/LHCC/97-17.1997. 893 P.
15. *Bondarenko V.G., Dolgoshein B.A., Kononov S.P. et al.* // Inst. and Exp. Techniques. 2012. V. 55 (2). P. 161.
16. Ambient Ozone Monitors. URL: <https://twobtech.com/products.html>
17. Precise Pressure Management. Blondelle. URL: <https://www.blondelle.com/en>
18. Измерение расхода (In Russia). URL: <https://ru.krohne.com/ru/pribory/izmerenie-raskhoda>
19. *Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н.* Физическая химия озона. М.: Московский университет, 1998. 480 с.
20. *Дытнерский Ю.И.* Основные процессы и аппараты химической технологии: 2-е изд. М.: Химия, 1991. 496 с.
21. *Аэров М.Э., Тодес А.М.* Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Л.: Химия, 1968. 512 с.
22. *Плановский А.Н., Рамм В.М., Каган С.З.* Процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия. 1962, 841 с.
23. Катализатор разложения озона гоппалюм марки ГТТ. URL: <http://timis.ru/production/catalyst/>
24. *Kestin J., Kobayashi Y., Wood R.T. et al.* // Physica. 1966. V. 32 (6). P. 1065.
25. High-Luminosity Large Hadron Collider. URL: [https://indico.cern.ch/event/512424/attachments/1246970/1855907/HL\\_ESFRI\\_ROADMAP.2016.03.10.pdf](https://indico.cern.ch/event/512424/attachments/1246970/1855907/HL_ESFRI_ROADMAP.2016.03.10.pdf)
26. *Tkachenko S.N., Egorova G.V., Zaloznaya L.A. et al.* // Russ. J. Phys. Chem. A. 2012. V. 86. № 11. P. 1654.