

РАЗРАБОТКА ДОЖИГАТЕЛЯ ФУМИГАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ БОЛЬШОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Сон-уп Ха родился в 1971 в городе Суване Республики Корея. Аспирант МАИ. Основные научные интересы — в области горения и равновесной термодинамики. Автор трех научных работ. E-mail: mars_hadius@hotmail.com

Seong-up HA was born in 1971, in Suwon, Republic of Korea. He is a Postgraduate Student at the MAI. His research interests are in burning and equilibrium thermodynamics. He has published 3 technical papers. E-mail: mars_hadius@hotmail.com

Статья посвящена проблеме разработки дожигателя фумигационной установки большой производительности. До-жигатель используется для очистки загрязненного воздуха от токсичных веществ. Проведен термодинамический ана-лиз, основанный на принципе химического равновесия произвольных гетерогенных систем.

A design problem is studied in regard to afterburner for high-productive fumigation facility. The afterburner is used to clean up contaminated air from toxic substances. Thermodynamic analysis is performed basing on the principle of chemical equilibrium for arbitrary heterogeneous system.

Ключевые слова: дожигатель, фумигационная установка, нейтрализация, термодинамическое равновесие.

Key words: afterburner, fumigation facility, neutralization, thermodynamic equilibrium.

1. Введение

Для уничтожения микроорганизмов, плесени и насекомых в воздухе может использоваться «фумигационная камера», в которую вводится загрязненный воздух с ядовитым газом, например бромметилом, фосфином, хлорпикрином, и т. д. Традиционно этот процесс называется фумигацией (или окуживанием), поэтому эти токсические вещества называются фумигантами.

Несмотря на то что фумиганты предназначены для уничтожения вредных живых существ в воздухе, они опасны для людей, поэтому, чтобы обеспечить экологическую чистоту выпускаемого из ФК газа, необходимо либо разделить, либо нейтрализовать токсичные фумиганты.

В Московском авиационном институте разработана ФК МАИ-202, которая является эффективной установкой для дезинфекции и дезинсекции широкого спектра объектов. Важными подсистемами этой ФК являются два контура очистки: первый контур очистки, обеспечивающий отделение фумигантов от загрязненного воздуха с помощью физического процесса, и второй контур очистки, обеспечивающий термическую нейтрализацию токсичных продуктов фумигации при химическом процессе после первого контура очистки. В первом контуре очистки используется либо турбодетандер,

либо мембранное устройство, либо холодильник, во втором контуре очистки — дожигатель.

В рассматриваемой задаче в качестве фумигантов используются бромметил и значительное количество углекислого газа. В фумигационной камере в 1 м^3 содержится 60 г $\text{СН}_3\text{Br}$, 200 г СО_2 и загрязненный воздух (табл. 1). После фумигации углекислый газ может выбрасываться без какого-то преобразования, но бромметил является токсичным веществом, поэтому его необходимо нейтрализовать.

Обычно в первом контуре очистки при посредстве устройства, выполняющего физическое отделение фумиганта, концентрация бромметила уменьшается, но пока его концентрация не достигает ПДК — предельно допустимой концентрации, во втором контуре требуется нейтрализация с помощью сгорания (табл. 2). При отказе первого контура, называемом аварийным режимом, во втором контуре (дожигателе) необходимо нейтрализовать весь бромметил, выпускаемый из ФК.

Пневмогидравлическая система ФУ большой производительности представлена на рис. 1. На этом рисунке в первом контуре очистки расположен турбодетандер, чтобы охлаждать загрязненный воздух конденсацией или сублимацией фумигантов. В этом случае выделенные из загрязненного воздуха фумиганты могут возвращаться и повторно использоваться.

Исходные данные для «АСТРА» и «СЕА»

	Компонент	Молекулярная масса	Стандартная энтальпия, кДж/кг	Масса в грязном воздухе, г/м ³	Масса на выходе дожигателя на 1 м ³ грязного воздуха, г
Грязный воздух	O ₂	31,9988	0,0	265,20	265,20
	N ₂	28,0140	0,0	873,43	873,43
	CO ₂	44,0095	-8941,5	200,00	200,00
	CH ₃ Br	94,9400	-397,5	60,00	60,00
Горючее	C ₃ H ₈	44,0960	-2373,9		20,00
Раствор добавления	K ₂ CO ₃ (т)	138,2055	-8331,8		48,04
	H ₂ O (ж)	18,0152	-15866,0		72,06
Сумма					1538,73

Таблица 2

ПДК в рабочей зоне

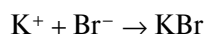
Газ	ПДК, мг/м ³
HBr	10,0
Br ₂	0,5
HCN	0,3
NH ₃	20,0
CH ₃ Br	1,0
CO	20,0

обходимо нейтрализовать с помощью химического процесса.

На рис. 2 видны концентрации продуктов сгорания, которые зависят от массы горючего. Концентрации HCN и NH₃ превышают ПДК только в восстановительном режиме, значит, если дожигатель работает в окислительном режиме, то их концентрации остаются неопасными. Но концентрация Br₂ увеличивается в окислительном режиме. А во всем режиме сгорания концентрация HBr превышает ПДК. В этом случае, чтобы нейтрализовать атом Br, нужно добавить металлический атом, который активно соединяется с бромом и преобразуется в нетоксичную молекулу. Для этого могут применяться добавки Na₂CO₃, K₂CO₃, CaCO₃, MgCO₃ и т.д. С учетом степени растворимости в воде, стоимости, экологического характера преобразуемых молекул нами выбрана 40%K₂CO₃ (табл. 3)

2. Нейтрализация токсичных веществ

Как уже говорилось, чтобы уничтожить микроорганизмы, плесень и насекомых в воздухе фумигационной установки, используется токсичный бромметил, поэтому после окулирования необходимо удалить его из воздуха. Для этого может использоваться процесс горения, который позволяет бромметилу разделиться, и его концентрация будет уменьшаться, но некоторые молекулы продуктов сгорания (например, HBr, Br₂, HCN, NH₃ и т.д.) являются токсичными веществами, поэтому их не-



При этой реакции калий и бром соединяются и преобразуются в бромистый калий (KBr), который считается нетоксичным веществом. Это вещество существует в твердом (кристаллическом) виде при температуре меньше 1003 °С.

Таблица 3

Характер молекул, содержащих металлический атом

Добавки	Состояние в нормальных условиях	Растворимость в воде в 100 мл	MSDS*	Молекула, соединение с бромом
Na ₂ CO ₃	Твёрдое	30 г	1 / 0 / 0	NaBr
K ₂ CO ₃	Твёрдое	112 г	1 / 0 / 0	KBr
MgCO ₃	Твёрдое	Нерастворимый	2 / 0 / 1	MgBr ₂
CaCO ₃	Твёрдое	10.6 мг	2 / 0 / 1	CaBr ₂

* MSDS : Material Safety Data Sheet (здоровье / горение / реактивность 0: безопасное ~ 5:самое опасное).

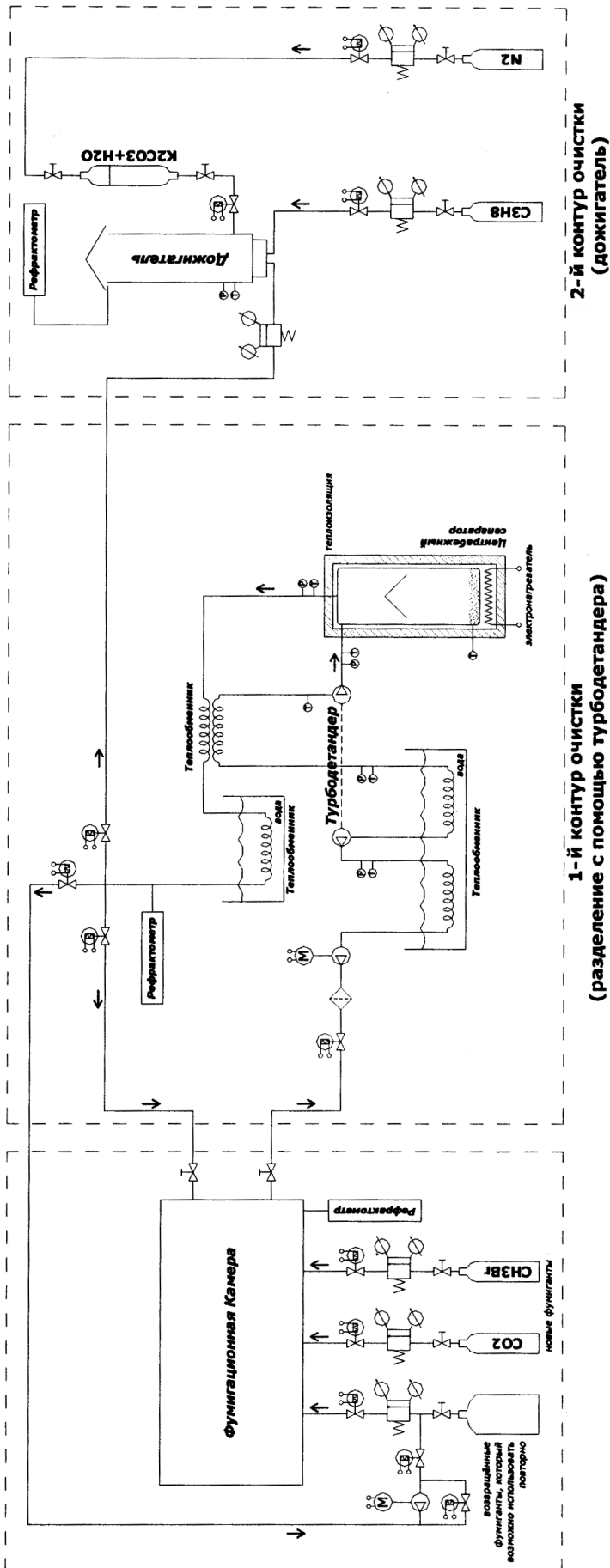


Рис. 1. Пневмогидравлическая система ФУ

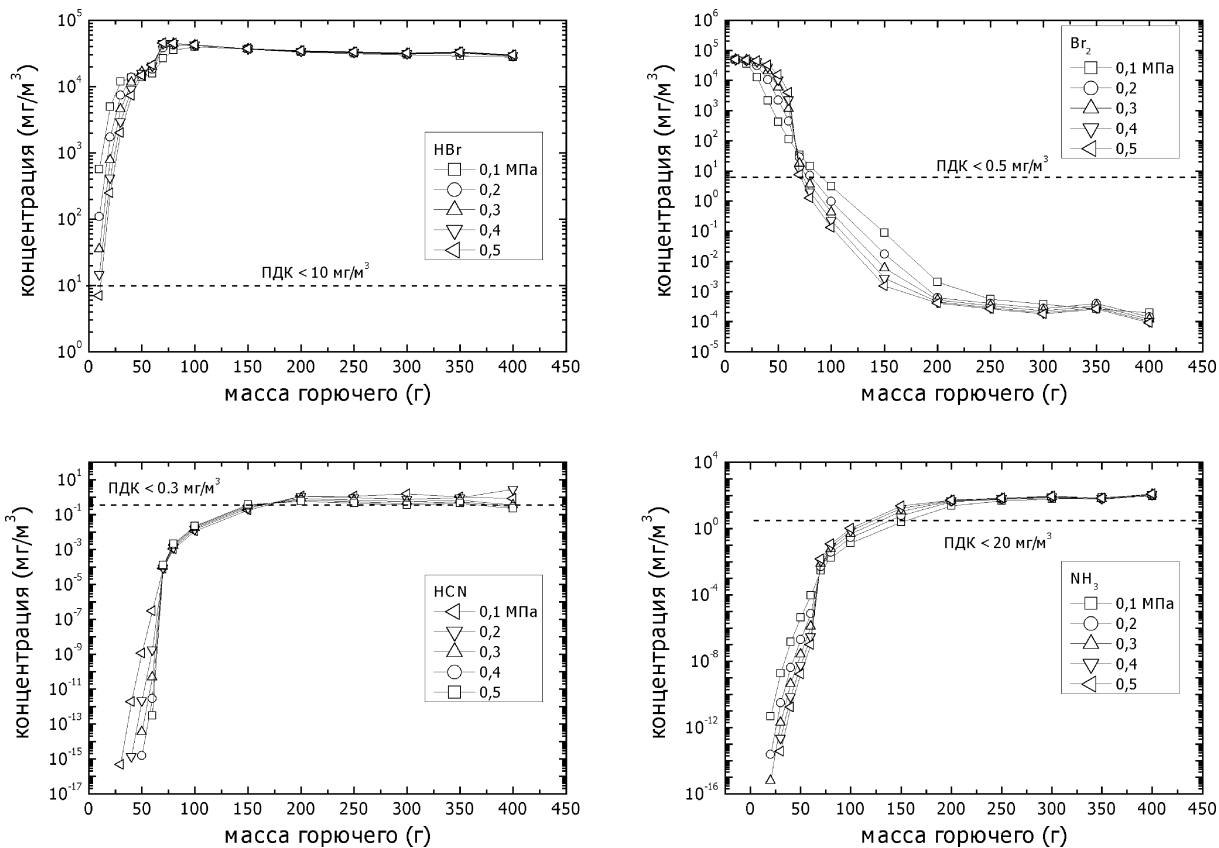


Рис. 2. Зависимость концентраций токсичных молекул продуктов сгорания в 1-й части камеры дожигателя от массы горючего на 1 м³ загрязненного воздуха

3. Структура камеры дожигания

На рис. 3 показана камера дожигания фумигационного устройства, состоящая из трех частей:

- первой части камеры сгорания с загрязненным воздухом и пропаном;

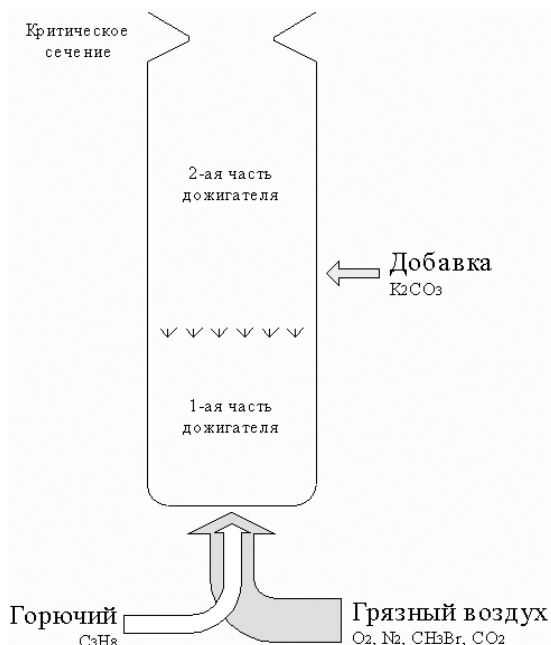


Рис. 3. Структура дожигателя

- второй части камеры сгорания после добавки нейтрализации;
- части критического сечения.

С увеличением давления в камере сгорания возрастает интенсивность рабочего процесса и соответственно уменьшается ее требуемый объем. Значит, если нужно нейтрализовать большой расход загрязненного воздуха, то лучше повысить давление в камере сгорания, чтобы уменьшить габариты дожигателя. Это подробно обсуждается в разд. 7.

4. Ограничение максимальной температуры в камере сгорания

Для нейтрализации токсичных веществ необходима высокая температура, при которой химическая реакция происходит более активно. Но чтобы обеспечить прочность конструктивных материалов, в камере дожигания ограничена максимальная температура. Обычно со стандартными материалами эта температура не превышает 1200 К.

Из рис. 4 видно, что с точки зрения управляемости лучше производить нейтрализацию в восстановительном режиме ($\alpha < 1$). В этом диапазоне изменение содержания горючего не очень влияет на изменение температуры и состав продуктов сгорания:

α — коэффициент избытка окислителя:

$$\alpha = \frac{K_m}{K_{m0}};$$

K_{m0} — стехиометрическое соотношение:

$$K_m = \frac{m_O}{m_T}.$$

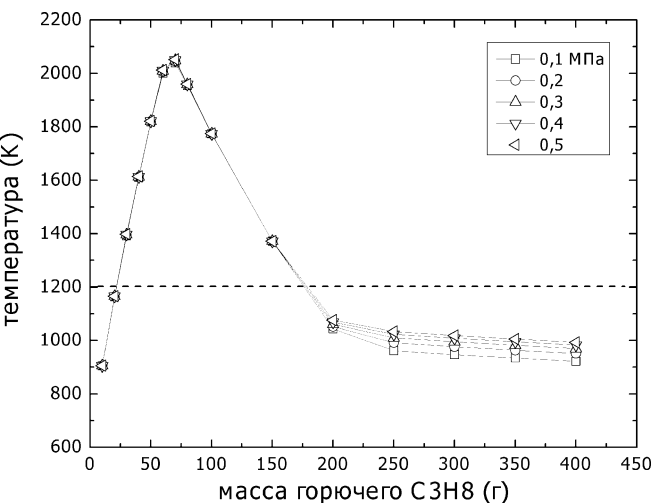


Рис. 4. Зависимость температуры в первой части камеры дожигателя от массы горючего на 1 м³ грязного воздуха

Однако с точки зрения экологии сгорание при $\alpha \geq 1$ лучше, чем при $\alpha < 1$, так как повышается полнота сгорания, а концентрации HCN и NH₃ обеспечиваются ниже ПДК.

Следовательно, несмотря на то, что управляемость при $\alpha > 1$ хуже, чем при $\alpha < 1$, следует выбрать режим с расходом горючего (пропана), обеспечивающим режим $\alpha > 1$, т. е. 10—20 г на 1 м³ загрязненного воздуха. Тогда температура сгорания в первой части не превышает 1166 К.

5. Исправление параметров программных комплексов

Программный комплекс «АСТРА-М» широко применяется в России для термодинамических расчетов, а «СЕА2» — в Америке. «АСТРА-М» и «СЕА2» называются программными комплексами, рассчитывающими химическое равновесие произвольных гетерогенных систем. «АСТРА-М» создана на фундаментальном принципе максимизации энтропии, а «СЕА2» на принципе минимизации энергии Гиббса. Эти алгоритмы в основном не отличаются друг от друга.

Такие программы допускают, что большие сложные молекулы (например, тяжелые углеводороды, макромолекулярные полимеры) и молекулы в жидком и твердом состоянии теоретически целиком разделяются на возможные мелкие молекулы, атомы и даже ионы, определяемые на базе исходных данных реагирующих веществ. При высокой температуре результаты расчетов по этим программным комплексам хорошо совпадают с экспериментальными результатами. Однако в реальном случае, особенно при низкой температуре, такого идеального разделения не происходит. Вследствие этого в некоторых задачах нужно исключить какие-то молекулы, которые при реакции действительно не создаются.

Когда температура невысока, при химической реакции легко происходят конденсация и кристаллизация. В нашей задаче температура в камере дожигания также не очень высокая и в продуктах сгорания содержится кристаллическое вещество KBr, которое существует в твердом состоянии при температуре ниже 1007 К (табл. 4). Но расчетные результаты показывают, что когда температура снижается ниже 607 К, K⁺ отделяется от кристаллического KBr, соединяется с NO₃⁻ и преобразуется в твердое соединение KNO₃:

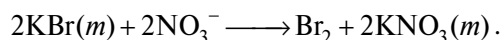


Таблица 4

Температуры замерзания и кипения

	Температура замерзания	Температура кипения
KBr	1007 К	1708 К
KNO ₃	607 К	673 К

В действительности образования KNO₃ не происходит.

Поэтому для нашей задачи надо исключить образование конденсированной соли KNO₃. Программные комплексы «АСТРА-М» и «СЕА2» имеют такую вариантность, чтобы откорректировать неожиданный результат.

На рис. 5 показаны концентрации HBr и Br₂ при изменении температуры с учетом исключения образования твердого KNO₃ при низкой температуре. Когда температура снижается ниже 600 К, при учете создания твердого KNO₃ концентрация Br₂ резко увеличивается. Практически такая реакция не существует.

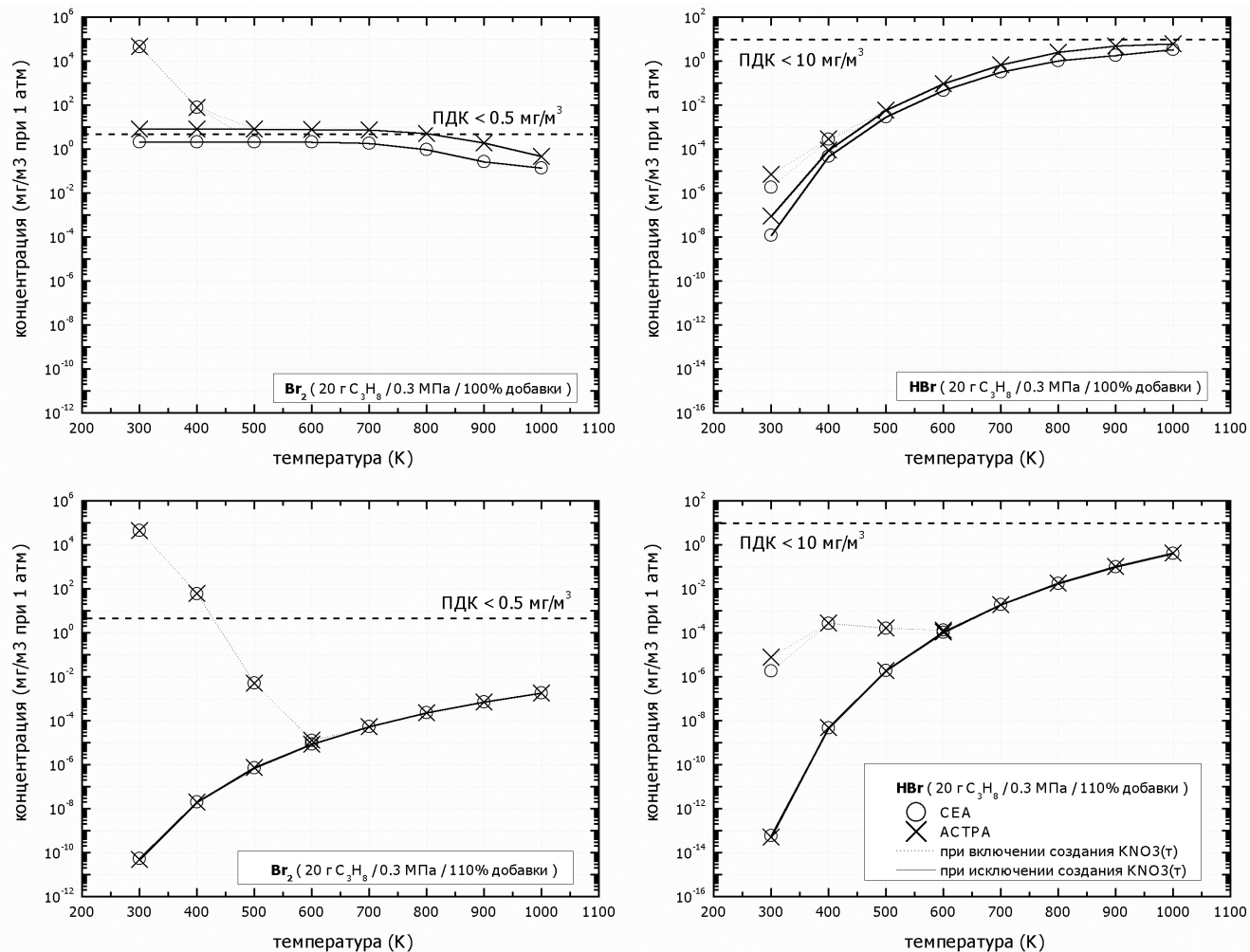


Рис. 5. Зависимость концентраций от температуры с горючим 20 г C₃H₈ и добавкой 43,67 г K₂CO₂ /65,51 г H₂O (100%) или 48,04 г / 72,06 г (110%) на 1 м³ загрязненного воздуха

Рассмотрим следующую реакцию. Для нейтрализации 1 моль CH₃Br теоретически требуется половина моля K₂CO₃. Значит, для удаления 60 г CH₃Br в 1 м³ загрязненного воздуха требуется 43,67 г K₂CO₃.

На рис. 5 показаны результаты с добавкой 43,67 г K₂CO₃ (100%) и 48,04 г (110%) на 1 м³ загрязненного воздуха. Видно, что практически не-сколько большая добавка будет лучшим вариантом.

6. Нейтрализация

На рис. 6 и 7 показаны распределения температуры и концентраций HBr и Br₂ по длине дожигателя. В этом процессе до выхода считается как адиабатическое расширение, а с выхода до атмосферной температуры (300 K) — неадиабатическое и исключается содержание твердой соли KNO₃. При горении в начале дожигателя пока остаются токсичные молекулы продуктов сгорания, далее после распыления добавки концентрации их быстро уменьшаются ниже ПДК.

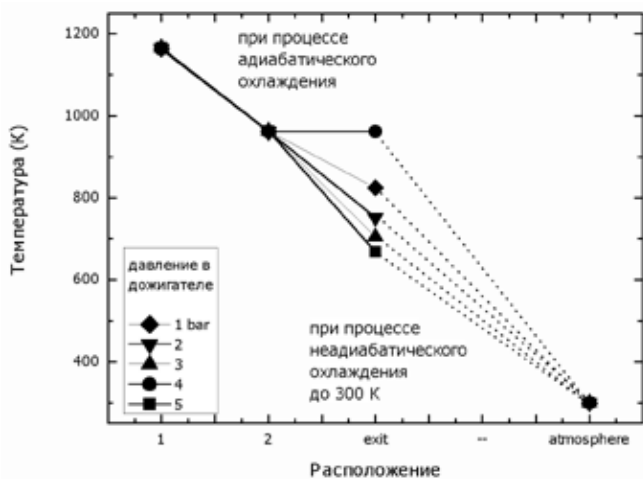


Рис. 6. Распределение температуры по длине дожигателя с горючим 20 г C₃H₈ и добавкой 48,04 г / 72,06 г (110%) на 1 м³ загрязненного воздуха

Кроме HBr и Br₂, определялись концентрации других токсичных молекул (Br, CH₃Br, HCN, NH₃,

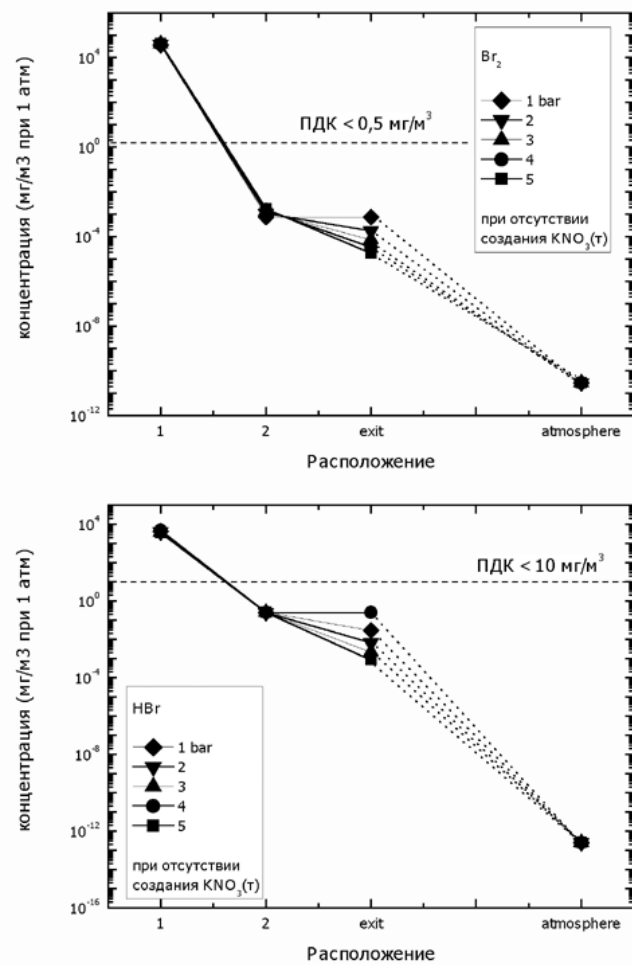


Рис. 7. Распределение концентраций по длине дожигателя

CO, HNO₃, NO₂, NO и N₂O). После добавления нейтрализатора они также остаются на очень низких уровнях, значительно ниже ПДК.

7. Габариты дожигателя

В рассматриваемой задаче горючее (пропан) и окислитель (загрязненный воздух) поступают в камеру в газообразном состоянии, поэтому они могут быстро смешиваться и сгорать. Дожигатель состоит из двух ступеней, а во второй части дожигателя в камеру выпрыскивается добавка в жидком состоянии. Если топливо впрыскивается в камеру сгорания в жидком состоянии, то происходит процесс испарения, который занимает длительное время, обычно более одной трети процесса горения, поэтому в любом случае важно обеспечить мелкий диаметр каплей. Вообще в промышленности жидкие капли распыляются диаметром 50–100 мкм, тогда для испарения капель требуется 10–20 мс. Отсюда можно говорить, что вторая часть камеры сгорания должна быть длиннее, чем первая. Следовательно, время пребывания в нашем дожигателе

будет порядка 100 мс. Точное время пребывания будет определено после детальной проработки конструкции.

Если давление в камере сгорания выше величины критического отношения давлений, то в критическом сечении скорость потока достигает $M = 1$, поэтому скорость в камере сгорания может быть рассчитана по соотношениям [8]

$$\frac{F_x}{F_{кр}} = \frac{1}{M_x} \sqrt{\left[\frac{1 + \frac{k-1}{2} M_x^2}{\frac{k+1}{2}} \right]^{\frac{k+1}{k-1}}};$$

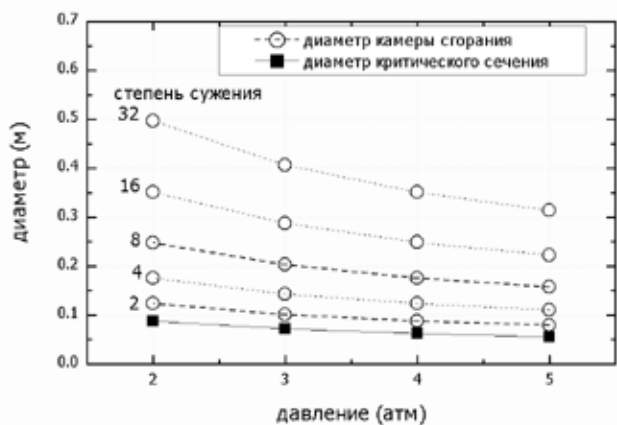
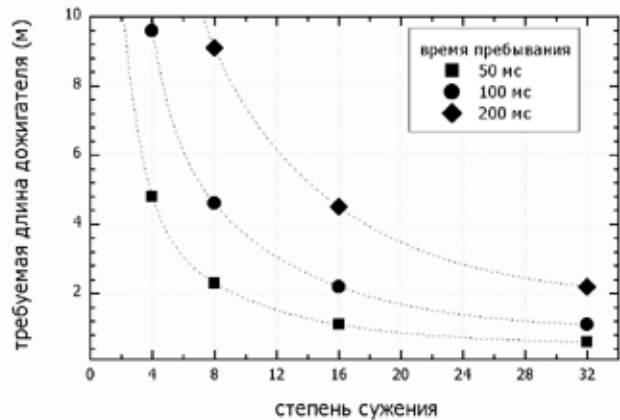
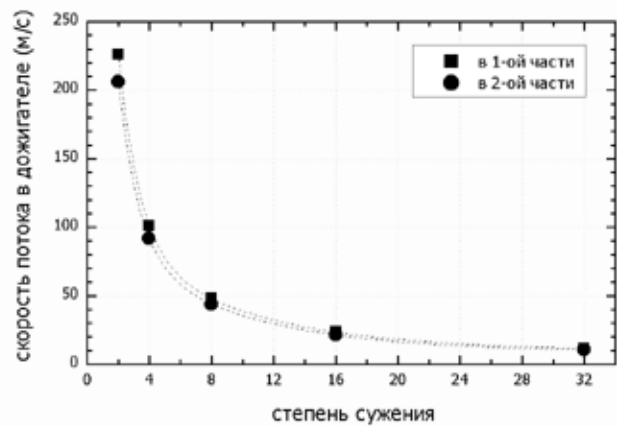


Рис. 8. Габаритные характеристики дожигателя

$$a = \sqrt{kRT};$$

$$V = M_x \times a;$$

$$l = V \times t_{\text{преб}}.$$

Отсюда видно, что скорость потока в камере определяется степенью сужения по площади. Другими словами, длина дожигателя не зависит от диаметра камеры, а зависит от отношения площадей сужающейся части на выходе: $F_k/F_{\text{кр}}$, где F_k — поперечная площадь камеры; $F_{\text{кр}}$ — площадь критического сечения.

Диаметр (или площадь) критического сечения определяется из соотношения [8]

$$\dot{m} = F_{\text{кр}} \times P_{\text{к}} \times \sqrt{\frac{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}{R \times T}}.$$

Результаты расчетов размеров дожигателя приведены на рис. 8.

Выводы

С помощью программных комплексов показано, что в процессе сгорания и добавления нейтрализатора можно обеспечить содержание продуктов сгорания загрязненного воздуха, в котором содержится молекула Вг, на достаточно низком уровне.

Библиографический список

1. Описание применения «АСТРА-М». — М.: МГТУ, 1997.
2. Stanford Gordon and Bonnie J. McBride, «Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications», RP-1311, NASA, 1994.
3. Jens Kauffmann, Armin Herberth, Martin Sippel, «Systems Analysis of a High Thrust, Low-Cost Rocket Engine», ESA, 2001.
4. Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе и воде. — Изд.2-е, пер. и доп. — Л.: Химия, 1975.
5. Козлов А.А. Определение режимов термической нейтрализации токсичных продуктов сгорания». — М.: Изд-во МАИ, 2006.
6. MSDS data, <http://www.sceincelab.com>
7. Stephen R. Turns. An Introduction to Combustion. Concepts and Applications. McGraw-Hill. 1999.
8. Dieter K. Huzel, David H, Huang. Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines. AIAA. 1992.

Московский авиационный институт
Статья поступила в редакцию 6.04.2009