

УДК 535.361;551.501.7

Теоретическая разработка лидарной установки космического базирования на основе непрерывного химического df-лазера для мониторинга атмосферы

Авдеев А.В.*, **Метельников А.А.****

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: alex021894@mail.ru*

***e-mail: Metelnikov91@gmail.com*

Аннотация

Статья является логическим продолжением научно-исследовательских работ, проведенных на кафедре “Энергофизические системы” МАИ (см. [1], [2]), в которых был разработан метод перевода генерации излучения непрерывных химических лазеров (НХЛ) в импульсно-периодический режим генерации излучения, и обоснована эффективность применения фтороводородных НХЛ космического базирования для исследования атмосферы. В данной работе производится теоретическая разработка лидарной установки космического базирования на основе DF-НХЛ для мониторинга атмосферы.

Ключевые слова: лидар, DF-НХЛ, оптическая локация, атмосфера, экология, мониторинг.

1. Введение

На сегодняшний день перед человечеством стоит проблема загрязнения атмосферы аэрозолями, появляющимися в результате повышения уровня урбанизации. Величина аэрозолей неестественного происхождения давно превосходит массу 296 т, приведенную в работе [3]. Подобные атмосферные изменения пагубно влияют на экологию. Первым шагом в решении данной проблемы является исследование аэрозолей с целью определения концентраций основных и примесных составляющих - мониторинг областей загрязнения.

Для подобных задач хорошо подходят лидарные установки, которые используют свойство лазерного излучения поглощаться веществами в различных степенях. На сегодняшний день существуют разработки лидаров наземного, авиационного и космического базирования. Установка лидара космического базирования представляет большой интерес из-за следующих основных преимуществ:

- 1) отсутствие шумов из-за рассеяния в загрязненных нижних слоях атмосферы, в результате чего отношение сигнал-шум увеличивается;
- 2) получение данных о профилях и о полях различных атмосферных параметров с высоким пространственным и временным разрешением;
- 3) широкий угол обзора.

Локационный лазерный сигнал, отправляемый на цель, может иметь различную длину волны в зависимости от типа используемого локационного лазера в лидаре. Наиболее эффективно использовать лазеры с длинами волн, которые попадают в окна прозрачности атмосферы (так как на этих длинах происходит

минимальное поглощение излучения): 0,95-1,06 мкм; 1,2-1,3 мкм; 1,5-2,4 мкм; 2,1-2,4 мкм; 3,3-4,0 мкм; 8,0-12,0 мкм. В данной работе предложено использовать лидарную установку космического базирования на основе фтороводородного НХЛ с генерацией излучения на молекулах DF (диапазон длин волн 3.5 - 4.1 мкм). Интерес к фтороводородным НХЛ связан с возможностью эффективного непосредственного преобразования внутренней химической энергии веществ, находящихся в баках системы хранения, в когерентное излучение, минуя другие стадии преобразования. Химический КПД НХЛ значительно превосходит КПД других лазеров и достигает ~ 15%, что позволяет получать высокую мощность излучения, недостижимую для других типов лазеров. Еще одним из преимуществ таких установок является то, что для их функционирования не требуется больших затрат электроэнергии, она требуется лишь для управления.

Целью данной работы является теоретическая разработка и проектирование лидарной установки на основе DF - НХЛ космического базирования с мощностью в непрерывном режиме работы 20 кВт, работающего в импульсно-периодическом режиме генерации излучения, для мониторинга атмосферы (высота базирования установки - 350 км); определение оптимальных характеристик подсистем лидарной установки космического базирования на основе DF-НХЛ для решения задач мониторинга атмосферы.

До настоящего времени в открытой литературе (например [2]) рассматривались только перспективы использования установок космического базирования на основе DF-НХЛ для мониторинга атмосферы без рассмотрения их

составляющих частей. Лидарная установка космического базирования на основе DF-НХЛ должна включать в себя следующие основные подсистемы:

- 1) генератор активной среды (ГАС) НХЛ (мощность работы в непрерывном режиме 20 кВт в режиме DF-излучения; в качестве прототипа такого ГАС выбран ГАС типа МГ-5, разработанный в НПО «Энергомаш» [4]);
- 2) оптическая схема (система задающий генератор - усилитель мощности с использованием электрооптических затворов из CdTe);
- 3) формирующая оптическая система;
- 4) приёмно - передающий канал излучения.

За модель атмосферы взята модель лета средних широт при влажности 70%, дальностью видимости 23 км и скорости ветра 10 м/с, полученная в работе [2]. В работе [2] для этого случая были рассчитаны значения коэффициентов пропускания атмосферы по закону Бургера - Ламберта для двух длин волн $T_{3,71} \sim 87,37\%$ и $T_{3,75} \sim 92,73\%$.

Для мониторинга атмосферы выбран механизм дифференциального поглощения и рассеяния (ДПР), так как он обладает наибольшей чувствительностью при измерении концентраций атмосферных аэрозолей [5]. Суть его заключается в следующем: дифференциальное поглощение двух лазерных пучков определяется по их сигналам обратного рассеяния, при этом частота одного из пучков настраивается близко на частоте данного молекулярного перехода (аналитическая частота), частота второго в стороне от частоты перехода (опорная частота). Для этого необходимо использовать излучение, которое состоит из двух длин волн – опорной (лежит на

границе линии поглощения) и аналитической (максимально поглощается исследуемым веществом). Для оценки работы установки выбран анализ концентрации метана, в качестве аналитической длины волны – 3,71 мкм, в качестве опорной – 3,75 мкм.

2. Особенности перевода DF-НХЛ в импульсно-периодический режим излучения

Перевод непрерывного излучения DF-НХЛ в импульсно-периодический режим осуществляется путём модуляции добротности резонатора задающего генератора с помощью электрооптических затворов (ячеек Покельса) из *CdTe*, которые в открытом состоянии имеют коэффициент пропускания равный 60 %. В закрытом состоянии достижим коэффициент отражения от граней электрооптических затворов равный 0.5 %. [1, 6].

На резонатор задающего генератора (ЗГ) DF-НХЛ при размещении в нем электрооптических затворов накладываются следующие ограничения:

1) апертура излучения ЗГ не должна превосходить площадь грани сонаправленной с потоком активной среды кристалла из *CdTe*, которая составляет $1,21 \text{ см}^2$;

2) генерируемая в резонаторе мощность не должна превосходить лучевую прочность кристаллов из *CdTe*.

Расчеты, проведенные в данной работе показали, что уровень мощности, генерируемой ЗГ, спроектированным с учетом названных выше ограничений, не

достаточен для осуществления мониторинга атмосферы [1]. Поэтому после ЗГ необходимо усиливать излучение в УМ, то есть использовать схему задающий генератор - усилитель мощности (ЗГ - УМ).

Использование в качестве ГАС прототипа ГАС МГ-5 накладывает ограничения по размеру активной среды перпендикулярному потоку (считаем, что размеры активной среды совпадают с размерами сопловой решетки), которое обусловлено потерей жесткости ГАС при размерах сопловой решетки, превышающих 40 см на 15 см.

Характерное время жизни фотона в резонаторе фтороводородного НХЛ с длиной оптического пути луча в нем 160 см составит 2,5 нс [1]. Для выбора длины импульса лидарной установки стоит иметь в виду, что слишком длинные импульсы не дадут объективной оценки атмосферы из-за изменения ее пространственного состава во времени. Значение импульса не может быть больше 10^{-3} с, так как за это время атмосфера полностью изменяет свой состав в силу турбулентности. При оценке длины импульса по времени жизни фотона в резонаторе получено значение импульса равное 15 нс.

В качестве материала фотоприёмника выбран InSb, так как он имеет постоянную времени $1.6 \cdot 10^{-9}$ с и пороговую длину волны 5.3 мкм, что позволяет воспринимать сигнал на длинах волн лежащих в спектре излучения молекулы DF.

3. Результаты проектирования оптической схемы ЗГ-УМ

Из условия лучевой прочности электрооптических затворов оптическая длина луча в активной среде ЗГ не должна превышать 160 см [1]. Для заданного в резонаторе ЗГ числа Френеля $N_f=3$ необходимо, чтобы база резонатора была ≥ 233 см [1]. С учетом полученных в предыдущих разделах ограничений, налагаемых на ЗГ, для генерации импульса длительностью 15 нс на установке DF-НХЛ, необходимо иметь ЗГ со следующими параметрами:

1. длина базы ≥ 233 см;
2. оптическая длина луча в АС ≤ 160 см;
3. площадь АС перпендикулярная потоку ≤ 600 см²;
4. апертура пучка $\leq 1,21$ см².

Оптическая схема, построенная в соответствии с этими ограничениями показана на рис. 1.

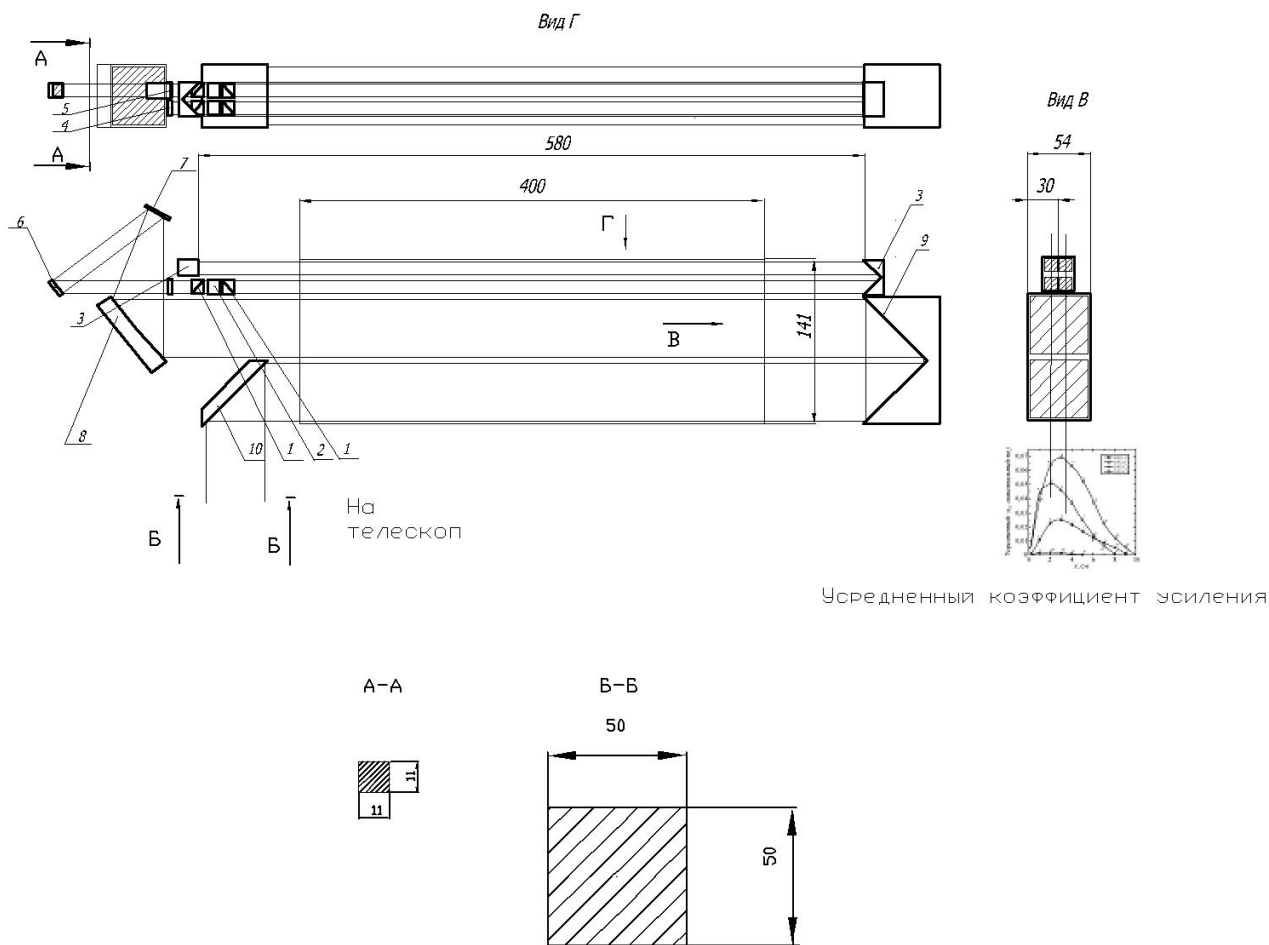


Рис. 1 – Оптическая схема (система четырехпроходный ЗГ и двухпроходный УМ): 1 – поляризатор, 2 – ячейка Поккельса, 3 – уголкоый отражатель, 4 – глухое зеркало, 5 - выходное зеркало; 6, 7, 8 – система ‘согласующий телескоп’, 9 – большой уголкоый отражатель, 10 - поворотное зеркало.

4. Расчет и проектирование формирующего телескопа

Для минимизации массогабаритных характеристик в качестве приемного телескопа используется формирующий телескоп передающего канала излучения.

Величина диаметра главного зеркала формирующего телескопа в данной работе выбрана, исходя из следующих соображений:

- минимизация массогабаритных характеристик из-за размещения лидарной установки на борту космического аппарата (КА);
- технологичность изготовления зеркала (зеркала с диаметром от 1 м очень сложны в изготовлении).

Площадь фотоприёмника бралась $A=0.1 \text{ м}^2$, тогда $D_{T1}= 0.357 \text{ м}$ [1] (D_{T1} - диаметр главного зеркала формирующего телескопа). Учитывая, что характерный размер входного пучка равен 5 см, то диаметр малого зеркала примем равным 6 см. Таким образом, коэффициент увеличения телескопа равен:

$$M_T = \frac{S_2}{S_1} = \frac{357}{50} = 7.14, \text{ где } S_2 \text{ и } S_1 - \text{ диаметры выходного и входного пучков.}$$

Для выбора подходящей базы телескопа необходимо оценить aberrации волнового фронта, возникающие при фокусировании излучения на расстоянии F [1]. Исходя из условия, что угловые сферические aberrации не должны превышать дифракционного предела $1.22 \lambda / D_{T1}$, можно получить выражение для оценки базы телескопа с M_T при использовании в нём зеркал со сферической формой поверхности:

$$L_T \geq \frac{(M_T - 1)}{4M_T} D_{T1}^3 \sqrt{\frac{M_T - 1}{M_T} \cdot \frac{D_{T1}}{\lambda}}, \text{ где } \lambda - \text{ центр спектра линии излучения молекулы } DF.$$

В качестве выходного телескопа будем использовать предфокальный телескоп системы Мерсена, так как при сферических зеркалах можно получить дифракционную расходимость с малой базой. Путем решения геометрической задачи находим радиусы кривизны первого и второго зеркал $R_2=28,75.18$ м, $R_1=32,5841$ м (рис. 2).

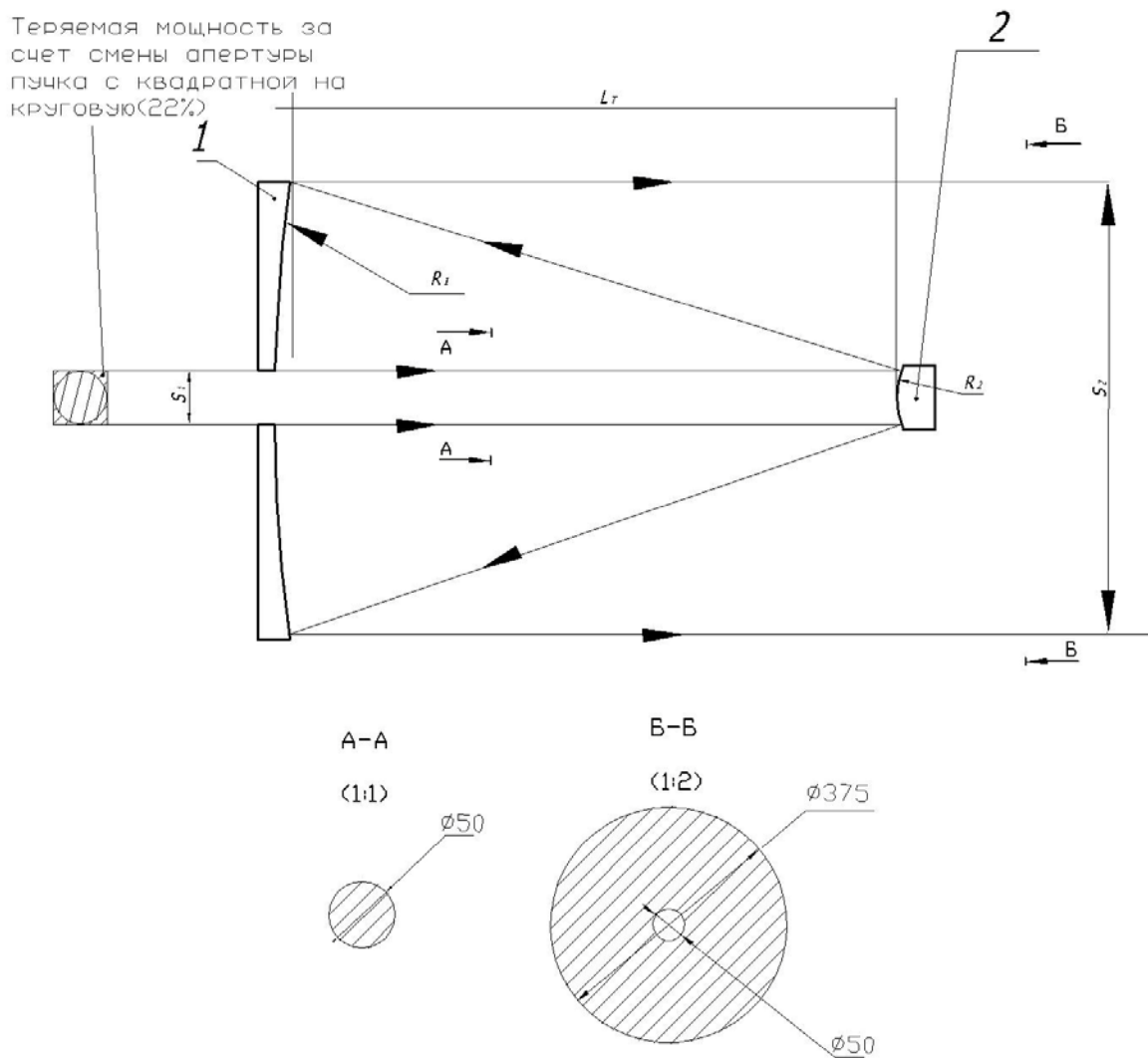


Рис. 2 Выходной телескоп лидарной установки.

5. Расчет принимаемого сигнала при пиковой мощности импульса 25 кВт

Сигнал, пришедший на приемное устройство, при этих параметрах составит:

$$P(\lambda) = 0,5 \cdot P_{\text{отст}} A T(\lambda) / L^2 \quad [6],$$

где L – расстояние до рассеивающего объема, P_0 – величина импульса (принята равной 25 кВт), $A = 0,1 \text{ м}^2$ - эффективная площадь фотоприёмника, $T(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания атмосферы. Для указанных выше данных и дальности до рассеивающего объема 350 км значение принимаемого сигнала составит $P_{3,71}=4,029 \cdot 10^{-12}$ Вт для длины волны 3.71 мкм и $P_{3,71}=4,079 \cdot 10^{-12}$ Вт для 3.75 мкм. Значение собственного шума приёмной системы P_{sh} , значение фоновой засветки $P_{фон}$ не превышает полезного сигнала и составили $P_{шум}=9,33 \cdot 10^{-13}$ Вт, $P_{фон}=4.1 \cdot 10^{-41}$ Вт [7], что позволяет успешно регистрировать сигнал.

6. Энергетический расчет пиковой мощности импульса на опорной и аналитической длинах волн при детектировании метана

Для детектирования концентрации метана методом ДПР в атмосфере в работе [2] приведены опорная $\lambda_2=3,75$ мкм (что соответствует колебательно-вращательному уровню $P_1(9)$) и аналитическая $\lambda_1=3,71$ мкм (что соответствует колебательно-вращательному уровню $P_2(6)$) длины волн.

В работе [1] для оценки средней мощности импульса дана следующая зависимость:

$$\bar{P}_{\text{вых}}^{3\Gamma}(P_v(j)) = f \cdot S \cdot L_a^{3\Gamma} \cdot h\nu \cdot N^{\text{изл}}(P_v(j)) \times \left(1 - \frac{1}{2\alpha_0^{\text{реал}}(P_v(j)) \cdot L_a^{3\Gamma}} \cdot \ln \frac{1}{R_1 \cdot k_{\text{пр}}^4} \right),$$

$$W_{\text{вых}}^{3\Gamma}(P_v(j)) = \bar{P}_{\text{вых}}^{3\Gamma}(P_v(j)) / f,$$

где $P_v(j)$ обозначен конкретный используемый колебательно-вращательный переход P -ветви, $N^{\text{изл}}(P_v(j))$ - инверсия населённости на данном колебательно-

вращательном переходе, $\alpha_0^{\text{реал}}(P_v(j))$ - коэффициент усиления, f - частота следования импульсов, $S=1.21 \text{ см}^2$ - площадь электрооптического затвора в направлении перпендикулярном сопловой решетке (СР) ГАС, $L_a^{3\Gamma}$ - длина оптического пути луча в АС ЗГ. Расчеты значений опорной и аналитической волн для детектирования метана на выходе ЗГ представлены в табл. 1.

Табл.1. Результаты расчета средней мощности на линиях $P_1(9)$ и $P_2(6)$ на выходе ЗГ.

Колебательно-вращательный уровень	$\bar{P}_{\text{вых}}^{3\Gamma}(P_v(j))$, Вт	$W_{\text{вых}}^{3\Gamma}(P_v(j))$, мДж
$P_1(9)$	13,3	0,32
$P_2(6)$	26,1	0,65

Выражение для нахождения энергии импульса излучения на данном колебательно-вращательном переходе на выходе УМ [1], [8]:

$$W_{\text{вых}}^{\text{УМ}}(P_v(j)) = S_a \cdot E_s^{v-v-1}(j) \cdot \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{W_{\text{вых}}^{3\Gamma}(P_v(j))}{S_a \cdot E_s^{v-v-1}(j)} \right) - 1 \right] \times \exp \left[2\sigma_D^{v-v-1}(j) \cdot N_{v-v-1}^{\text{изл}}(j) \cdot L_a^{\text{УМ}} \right] \right\},$$

где S_a - площадь активной среды в направлении параллельном СР, $E_s^{v-v-1}(j)$ - плотность энергии насыщения перехода, $\sigma_D^{v-v-1}(j)$ - сечение усиления на колебательно-вращательном переходе, $L_a^{\text{УМ}}$ - длина оптического пути луча в АС УМ.

$$PP_{\text{вых}}(j_v(\cdot), \tau_p) = \frac{W_{\text{вых}}^{\text{УМ}}(\cdot)}{\Delta \tau_p}.$$

Результаты расчета пиковой мощности импульса на выбранных линиях на выходе УМ представлены в табл. 2.

Табл. 2. Результаты расчета мощности импульса на спектральных линиях молекулы DF на выходе из УМ

Колебательно-вращательный уровень	$P_{\text{вых}}^{\text{И}}(j_v(\cdot), \tau_p)$ кВт	$W_{\text{вых}}^{\text{УМ}}(P_v(j))$, мДж
$P_1(9)$	186	7,7
$P_2(6)$	518	2,7
P_{Σ} , МВт	2,65	

7. Расчет диапазона детектируемой концентрации метана, пропана и этана в атмосфере

В предыдущем разделе была рассчитана пиковая мощность импульса на выходе из системы ЗГ-УМ. Используя данные [1], найдем мощность принимаемого сигнала для линий $P_1(7) + P_1(6)$ – опорная и аналитическая линии для этана, $P_1(8) + P_1(7)$ – опорная и аналитическая линии для пропана. Также проведем оценку определения максимальной надфоновой концентрации и минимально измеряемой концентрации C_3H_8 , CH_4 , C_2H_6 в атмосфере, а также минимально детектируемой концентрации данных веществ по методике, приведенной в работе [2] (см. табл. 3).

Табл. 3. Регистрируемый приёмным каналом сигнал, максимальная и минимальная концентрация регистрируемых углеводородов.

Выбранные линии спектра DF	$P_{\text{рег, Вт}}$ (4-х проходный ЗГ)	$\int_0^L \alpha C(L)dL_{\text{max}},$ мг/м ³	$\int_0^L \alpha C(L)dL_{\text{min}},$ мг/м ³
Этан, C ₂ H ₆			
P ₁ (7) опорная	6,23 · 10 ⁻⁹	434	0.036
P ₁ (6) аналитическая	5,72 · 10 ⁻⁹		
Пропан, C ₃ H ₈			
P ₁ (8) опорная	6,54 · 10 ⁻⁹	472	0.21
P ₁ (7) аналитическая	6,57 · 10 ⁻⁹		
Метан, CH ₄			
P ₂ (6) аналитическая	2,022 · 10 ⁻⁸	735	1.02
P ₁ (9) опорная	6,67 · 10 ⁻⁹		

8. Оценка массогабаритных характеристик установки

Массогабаритные характеристики основных систем для обеспечения работы установки DF в течение 1495,25 с представлены в табл. 4. Также, по методике, предложенной в работе [1], дополнительно были рассчитаны массовые характеристики КА и подобран ракетоноситель для вывода КА на орбиту базирования 350 км. Оценённая собственная масса КА для размещения на нем

спроектированной лидарной установки составила $M_{ОКА}=2970$ кг. В качестве ракетоносителя (РН) выбран РН «Протон-М».

Табл. 4. Массогабаритные параметры основных систем установки DF-НХЛ для 2 варианта 4-х проходного ЗГ.

Наименование системы	$M, \text{ т}$	$V, \text{ м}^3$
ГАС	0,143	0,114
Система подачи компонентов топлива	0,166	0,150
Выхлопная система	0,047	0,157
Система хранения компонентов топлива	2,259	5,899
Оптические системы	0,150	0,0181
Всего	2,765	6,4941

9. Выводы

В работе проведена теоретическая оценка основных подсистем космической лидарной установки на основе DF-НХЛ, работающего в импульсно-периодическом режиме, для обнаружения повышенной концентрации вредных веществ в атмосфере, в частности углеводородов.

В результате выполнения работы получены следующие основные результаты:

- 1) Произведена разработка подсистем установки, включающей в себя приемно-передающий канал излучения, фотоприёмник, установку DF-НХЛ.

- 2) В качестве ГАС предлагается использовать прототип МГ-5 увеличенный по одной координате [9]. Площадь СР ГАС составила 564 см^2 .
- 3) Для перевода излучения DF-НХЛ в импульсный режим использован метод модуляции добротности резонатора. Для его реализации в пространстве резонатора размещены электрооптические затворы из CdTe. Частота следования импульсов 40 кГц, длительность импульса составила 15 нс. Пиковая мощность импульса во всем спектральном диапазоне излучения молекулы DF составила 2,6 МВт. Размеры пучка на выходе из УМ $5 \times 5 \text{ см}$.
- 4) При разработке приемного устройства материалом фотоприёмника был выбран InSb. Эффективная площадь ФПУ составила $0,1 \text{ м}^2$.
- 5) В качестве приемного и выходного телескопов лидарной установки в работе предложено использовать один телескоп системы Мерсена с размером базы телескопа 2,93 м и коэффициентом увеличения 7,14.
- 6) Масса КА составила 2,97 т. Масса спроектированной установки составила 2,765 т, занимаемый объем – $6,49 \text{ м}^3$. Время работы установки на рабочем режиме составило 1495,25 с, что позволяет провести 299 испытаний длительностью 5 с. В качестве РН для вывода КА с лидарной установкой на орбиту базирования в работе предложено использовать РН «Протон-М».
- 7) Произведена оценка диапазона измеряемой концентрации для пропана ($472 - 0,21 \text{ мг/м}^3$, верхний предел превосходит предельно-допустимую концентрацию (ПДК) в 1,5 раза), этана ($434 - 0,036 \text{ мг/м}^3$, верхний предел превосходит ПДК в 1,5 раза) и метана ($735 - 1,02 \text{ мг/м}^3$, верхний предел превосходит ПДК в 2 раза).

Библиографический список

1. Авдеев А.В. Теоретические основы создания многоцелевой космической лазерной установки на основе фтороводородных непрерывных химических лазеров (НХЛ). LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 228 с.
2. Химический импульсно-периодический лазер с непрерывной накачкой и модуляцией добротности резонатора. Патент РФ № 2494510 / (МАИ) (RU) / .Авдеев А.В., Башкин А.С. Бюл.№27 от 27.09.2013.
3. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Оптика атмосферного аэрозоля (том. 4), Гидрометеоиздат, - Ленинград, 1987. – 250 с.
4. Путь в ракетной технике / Под. ред. академика РАН Б.И. Каторгина. – М.: Машиностроение, 2004. – С. 165–170.
5. Фотоприемники видимого и ИК диапазонов. Под редакцией Р.Дж. Киеса, Москва, “Радио и связь”, 1985. – 398 с.
6. Башкин А.С., Каторгин Б.И., Хомяков А.А. О возможности применения DF-НХЛ космического базирования для анализа содержания углеводов в атмосфере // Труды НПО Энергомаш. 2010. №27. С. 315–330.
7. Васильев Б.И., Маннун У.М. Инфракрасные лидары для экологического мониторинга атмосферы: Учебное пособие. - М.: МФТИ, 2005. – 71с.
8. Башкин А.С., Гуров Л.В., Каторгин Б.И., Степанов А.А. Расчётное исследование трёхдиапазонного НХЛ с одновременной генерацией на молекулах HF, DF и CO₂. // Труды НПО Энергомаш. 2008. № 26. С. 207–224.

9. Семёнов С.Н. Основы проектирования генераторов активной среды фтороводородных непрерывных химических лазеров. – М.: МАИ, 2010. - 398 с.