

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»
(Самарский университет)

Н.Д. СЕМКИН

ГАЗОПЫЛЕВАЯ АТМОСФЕРА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА ЕЕ КОНТРОЛЯ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по программам высшего образования укрупненной группы направлений и специальностей 24.00.00 Авиационная и ракетно-космическая техника

С А М А Р А
Издательство Самарского университета
2016

УДК 629.78(075)
ББК 39.6я7
С307

Рецензенты: чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., заслуж. деят. науки и техники РФ Г.П. Аншаков,
д-р техн. наук, проф., заслуж. деят. науки и техники РФ В.Л. Балакин

Семкин, Николай Данилович

С 307 **Газопылевая атмосфера космических аппаратов и электронные средства ее контроля:** учеб. пособие / *Н.Д. Семкин.* – Самара: Изд-во Самарского университета, 2016. – 252 с.

ISBN 978-5-7883-1072-5

Представлены литературные данные и собственные экспериментальные и теоретические результаты автора в области газовыделения конструкционных материалов, а также газоаэрозольного выделения двигательных установок. Рассмотрены методы расчета процессов массопереноса от источников, характерных для двигательных установок (ДУ).

Представлены результаты оценочного расчета суммарного объема газовыделения материалов космического аппарата (КА), суммарной массы продуктов газовыделения и их массовой скорости; методики расчета удельного уровня конденсации низкомолекулярных соединений от работы ДУ, примеры расчетов по определению удельного уровня конденсации для некоторых КА, а также уровня концентрации пылевой компоненты.

Приведены результаты расчета движения пылевых частиц в окрестности КА, модели расчета преобразователей параметров пылевых частиц; методы и устройства для регистрации твердых частиц в окрестности космического аппарата, а также масс-спектрометры для исследования газовой составляющей его внешней атмосферы.

Учебное пособие может быть полезным для студентов, аспирантов, инженеров соответствующих специальностей в области проектирования космических аппаратов, двигательных установок КА, разработки научной аппаратуры для космических исследований, а также для научных работников предприятий космического профиля.

Подготовлено на кафедре КТЭСиУ.

УДК 629.78(075)
ББК 39.6я7

ISBN 978-5-7883-1072-5

© Самарский университет, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	8
1 Газоаэрозольное выделение двигательных установок.....	11
1.1 Факторы, обуславливающие образование собственной внешней атмосферы	11
1.2 Параметры СВА, обусловленные газоаэрозольным выделением двигательных установок	13
1.3 Методы оценки обобщенных параметров СВА, обусловленных газовой выделением ДУ	15
1.3.1 Суммарная масса продуктов газовой выделением ДУ.....	15
1.3.2 Суммарная и импульсная массовые скорости газовой выделением ДУ	18
1.3.3 Объемные характеристики газовой выделением ДУ	19
1.4 Пример оценочного расчета обобщенных параметров СВА, обусловленной газовой выделением ДУ	19
1.4.1 Постановка вопроса	19
1.4.2 Исходные характеристики, использованные при проведении оценочного расчета	22
1.4.3 Суммарная масса продуктов газовой выделением ДУ.....	22
1.4.4 Суммарная и импульсная массовые скорости газовой выделением ДУ	24
1.4.5 Объемные характеристики газовой выделением ДУ	24
1.4.6 Парциальный состав продуктов газовой выделением ДУ	25
1.5 Модели распределения плотности в поле течения струи ДУ.....	29
1.6 Методы расчета процессов массопереноса от источников, характерных для ДУ	37
1.6.1 Основополагающие представления	37
1.6.2 Методика расчета прямых потоков	43
1.6.3 Методика учета переотражения прямых потоков в системах со сложной геометрией.	46
1.6.4 Методика учета эффектов рассеяния частиц струи.	46
2 Газовыделение конструктивных материалов космического аппарата	50
2.1 Параметры газовой выделением конструктивных материалов КА ...	50

2.1.1 Общие положения	50
2.1.2 Кинетика процессов газовыделения конструкционных материалов КА	52
2.1.3 Радиационные аспекты дегазации и деструкции конструкционных материалов КА	58
2.1.4 Парциальный состав продуктов дегазации конструкционных материалов КА	58
2.1.5 Суммарное объемное газосодержание конструкционных материалов КА	63
2.2 Методы оценки обобщенных параметров СВА, обусловленной газовыделением материалов конструкций КА.....	65
2.2.1 Постановка вопроса.....	65
2.2.2 Суммарная скорость и объем газовыделения конструкционных материалов КА	66
2.2.3 Суммарная масса и массовая скорость дегазации конструкционных материалов КА	70
2.2.4 Концентрация газовых молекул продуктов дегазации поверхности КА.....	75
2.2.5 Эквивалентное давление продуктов дегазации у поверхности КА.....	77
2.3 Параметры аэрозольной составляющей выбросов ДУ	79

3 Удельные уровни конденсации низкомолекулярных соединений от работы ДУ	84
3.1 Постановка задачи.....	84
3.2 Методология расчета уровня конденсации.....	84
3.3 Схема программы расчета удельного уровня конденсации	86
3.4 Результаты машинного эксперимента по определению удельного уровня конденсации (пример: КА “ГЛОБАЛСТАР”).....	88
3.5 Расчет удельного уровня конденсации низкомолекулярных соединений от газовыделения конструкционных материалов	90
3.5.1 Постановка задачи.....	90
3.5.2 Методология расчета уровня конденсации.....	91
3.5.3 Алгоритм программы расчета удельного уровня конденсации.....	92
3.5.4 Результаты машинного эксперимента по определению удельного уровня конденсации низкомолекулярной составляющей от процессов газовыделения конструкционных материалов ЛА “Глобалстар”	93
3.6 Расчет уровня концентрации пылевой компоненты	95

3.6.1	Постановка задачи.....	95
3.6.2	Алгоритм программы расчета уровня концентрации пылевой компоненты (БВ ИСАРсПГ)	96
3.6.3	Результаты машинного эксперимента по определению уровня концентрации пылевой компоненты	97
4	Методы и средства регистрации пылевых частиц СВА КА	99
4.1	Предварительные замечания.....	99
4.1.1	Визуальные наблюдения пылевых частиц с борта пилотируемых КА	99
4.1.2	Экспериментальные исследования параметров пылевой компоненты.....	101
4.1.3	Повреждающее воздействие ПК	104
4.2	Происхождение пылевых частиц	105
4.2.1	Атмосферная и технологическая пыль.....	105
4.2.2	Разрушение покрытия ЭВТИ	106
4.2.3	Образование ПК при работе двигательных установок ориентации, коррекции и ДУ РН.....	106
4.3	Влияние внешних сил на траекторию движения частиц пыли	107
4.3.1	Гравитационное притяжение.....	107
4.3.2	Световое давление.....	107
4.3.3	Газокинетические силы	107
4.3.4	Электростатические силы.....	108
4.4	Оптические характеристики пылевой компоненты	108
4.4.1	Оценка оптических характеристик.....	108
4.4.2	Взаимосвязь между дальностью наблюдения пылевой частицы и ее оптическими характеристиками.....	109
4.5	Экспериментальные методы изучения пылевой компоненты: наземные методы и приборы для измерения характеристик ПК.....	110
4.5.1	Методы и приборы измерения концентрации пыли, основанные на предварительном ее осаждении	110
4.5.1.1	Весовой метод и приборы	110
4.5.1.2	Радиоизотопный метод и приборы.....	112
4.5.1.3	Фотометрический метод.....	113
4.5.1.4	Люминесцентный метод.....	114
4.5.1.5	Пьезоэлектрический метод.....	115
4.5.2	Методы и приборы измерения концентрации пыли без предварительного ее осаждения	116

4.5.2.1	Оптические методы.....	116
4.5.2.2	Абсорбционный метод и приборы.....	119
4.5.2.3	Метод и приборы интегрального светорассеяния....	119
4.5.2.4	Приборы и методы счета частиц по интенсивности рассеянного света	120
4.5.2.5	Голографический метод.....	122
4.5.2.6	Индукционный метод и приборы	122
4.5.2.7	Контактно-электрический метод и приборы	123
4.5.2.8	Емкостный метод и приборы	124
4.5.3	Анализ существующих наземных методов измерения параметров ПК с точки зрения их применимости для проведения натуральных экспериментов	124
4.5.3.1	Предварительные замечания	124
4.5.4	Экспериментальные способы изучения параметров ПК.....	125
4.5.4.1	Требования, предъявляемые к бортовой аппаратуре по изучению параметров ПК.....	125
4.5.4.2	Возможные варианты реализации комплекса НА для изучения характеристик ПК	126
5	Модели преобразователей пылевой компоненты СВА КА	134
5.1	Движение пылевых частиц в окрестности космического аппарата	134
5.2	Траектория частицы при движении по эллиптической орбите.....	139
5.3	Траектории движения частицы на эллиптической и геосинхронной орбитах	141
5.4	Модели преобразователей на основе явления инстинкции света в газовой-пылевой среде.....	145
5.5	Модели преобразователя на основе зарядки частиц	164
5.6	Движение частиц после отрыва от поверхности КА.....	171
5.7	Уравнения движения заряда в поле	177
6	Преобразователи газовых потоков частиц	180
6.1	Основные принципы масс-спектрометрии.....	180
6.2	Основные характеристики масс-спектрометров.....	183
6.3	Требования, предъявляемые к масс-спектрометрам	184
6.4	Области применения масс-спектрометрии	185
6.5	Источники ионизации газообразных и твердых веществ	187
6.5.1	Ионизация электронным ударом	187

6.5.2 Химическая ионизация	188
6.5.3 Фотоионизация	189
6.5.4 Десорбция электрическим полем.....	189
6.5.5 Лазерная десорбция/ионизация.....	190
6.5.6 Матрично-активированная лазерная десорбция/ионизация (MALDI)	191
6.6 Существующие в настоящее время масс-спектрометры времяпролетного типа.....	192
6.6.1 Времяпролетные масс-спектрометры с ионизацией электронным ударом.....	192
6.6.2 Времяпролетные масс-спектрометры с ионизацией высокоскоростным соударением	212
6.6.3 Времяпролетные масс-спектрометры с лазерной ионизацией.....	222
Заключение	230
Библиографический список	234

ВВЕДЕНИЕ

На основании имеющихся в настоящее время экспериментальных данных под понятием газопылевое окружение или собственная внешняя атмосфера космического аппарата (ГПО КА или СВА) принято подразумевать:

Газопылевая (в том числе аэрозольная) обстановка в окрестности КА обусловлена как взаимодействием КА с факторами КП, так и существованием на КА собственных источников газопылевых компонент. Исходя из общих представлений о механизмах протекания газодинамических процессов в разреженных средах, можно сделать заключение, что СВА является сугубо неравновесным образованием (последнее обстоятельство создает известные трудности в экспериментальных и теоретических исследованиях СВА). Неравновесный характер процессов эволюции СВА предполагает существование в ней газовых (пылевых) потоков, имеющих ярко выраженный направленный характер.

Имеющиеся в настоящее время данные относительно интенсивностей потоков газовых сред, составляющих СВА, однозначно свидетельствуют о возможности оказания ими повреждающего воздействия на элементы конструкций КА. При этом следует иметь в виду, что повреждающее воздействие СВА может проявляться как непосредственным образом, так и с другими возмущающими факторами КП, в частности радиационной и электрической обстановкой в области пространства, примыкающей к КА. В свете имеющихся представлений о механизмах физико-химических процессов, обуславливающих повреждающее воздействие, комплексное влияние СВА и факторов КП представляется более вероятным.

Последнее обстоятельство позволяет сформулировать критерии выбора параметров, определяющих состояние СВА с по-

зий ее повреждающего воздействия на элементы конструкций КА.

Неравновесный характер СВА не допускает использования в качестве параметра состояния СВА давление газовой среды, а следовательно, и корректное использование основного уравнения газового состояния. (Это приносит ряд трудностей практического характера при постановке моделирующих и имитационных исследований повреждающего воздействия СВА). В этой связи основные параметры состояния СВА должны определять концентрационные и энергетические характеристики газовых потоков, обуславливающих СВА.

Преследуя цель оценить повреждающее воздействие СВА, динамические характеристики удобно выражать не в виде скорости молекул, а в виде энергии поступательного движения с последующим сопоставлением этих данных с энергетическими характеристиками элементарных актов физико-химических процессов.

Следующей важной характеристикой СВА является парциальный состав последней. Обладая сведениями о парциальном составе, можно существенно ограничить (а в ряде случаев и конкретизировать) круг элементарных процессов, обуславливающих повреждающее воздействие СВА.

Широкий круг физико-химических процессов, определяющих состояние системы «твердое тело – газ», предполагает в своей основе электронные механизмы взаимодействия индивидуальных частиц. Здесь следует упомянуть не только первичные окислительно-восстановительные процессы и электрическое инициирование процессов полимеризации покрытий, но и вторичные эффекты, обусловленные влиянием электрического потенциала поверхности КА. Поэтому список параметров СВА следует дополнить электрическими характеристиками, а именно концентрациями ионной и электронной составляющих газовых потоков.

В качестве основных параметров и характеристик, определяющих состояние СВА, предложено рассматривать:

1. Суммарный объем и объемную скорость газовыделения материалов и элементов конструкций КА.
2. Суммарную массу и массовую скорость продуктов газовыделения КА.
3. Концентрацию газовых молекул продуктов дегазации у поверхности КА.
4. Эквивалентное давление газовых молекул СВА.
5. Эффективный размер СВА.
6. Парциальный состав газовых компонент СВА.
7. Концентрацию ионной и электронной составляющих КА СВА.
8. Пространственно-временное представление концентрации газовых молекул СВА.
9. Энергетические характеристики газовых молекул, образующих СВА.
10. Характеристики пространственной ориентации газовых потоков газовыделения КА.
11. Характеристики возвратных потоков газовыделения КА.

Представленный перечень параметров определяет тот минимальный объем информации, который, в первом приближении, окажется достаточным для постановки дальнейших работ, связанных с определением повреждающего воздействия СВА.

1 ГАЗОАЭРОЗОЛЬНОЕ ВЫДЕЛЕНИЕ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

1.1 Факторы, обуславливающие образование собственной внешней атмосферы

Совокупность факторов, вызывающих появление собственной внешней атмосферы (СВА) можно разделить на две группы: импульсные и непрерывные.

Непрерывные факторы действуют на протяжении всего срока службы КА и обуславливают монотонный характер вариаций параметров СВА. К непрерывным факторам следует отнести:

- возмущение плотности атмосферы КП, вызванное поступательным движением КА в КП;
- газовыделение конструкционных материалов наружных элементов конструкций КА;
- газовыделение из герметизированных отсеков КА.

Импульсные факторы действуют весьма непродолжительное время по отношению к общему сроку службы КА, и их проявление носит дискретный характер. К импульсным источникам следует отнести:

- продукты сгорания двигательных установок;
- выбросы топлива двигательных установок в результате продувок топливных магистралей,
- продукты термического испарения конструкционных материалов двигательных установок;
- продукты срабатывания пиротехнических устройств;
- прочие выбросы различных компонент жизнедеятельности КА;
- локальные выбросы масс, обусловленные взаимодействием метеоритных потоков с поверхностью КА.

За исключением последнего момента, импульсные источники имеют детерминированный характер, определяемый режимом работы КА, что в принципе упрощает задачу определения их вклада в СВА. Кроме того, импульсные источники, как правило, обладают ограниченным (в ряде случаев априорно известным) парциальным составом газовых компонент. Следует отметить, что деление источников (факторов) СВА на непрерывные и импульсные в определенном смысле имеет условный характер. Дело в том, что продукты газовой выделенной импульсных источников, сорбируясь на поверхности КА, в дальнейшем выступают в качестве непрерывных источников газовой выделенной.

В ряде случаев бытует мнение, что параметры СВА в основном определяются импульсными источниками газовой выделенной, благодаря значительному объему продуктов газовой выделенной последних. С этим мнением можно согласиться, когда речь идет о молекулярно-кинетических характеристиках СВА как таковых. Однако под углом зрения оценки повреждающего воздействия СВА, роль различных источников газовой выделенной может радикальным образом измениться в ту или иную сторону в зависимости от конкретного механизма деградации элементов конструкции КА.

Более того, повреждающее воздействие мощных источников газовой выделенной может оказаться весьма незначительным ввиду ограниченности парциального состава и малой химической активности газовых компонент. Могут наблюдаться явления обратного характера, например, весьма малые концентрации атомарного кислорода атмосфера КП могут оказать существенное повреждающее воздействие как благодаря их высокой химической активности, так и значительней скорости поступательного движения КА. Учитывая эти обстоятельства, в настоящей работе рассмотрен достаточно широкий круг источников образования СВА, независимо от интенсивностей их газовой выделенной. Кроме того, там, где оказывается возможным, проведена предварительная оценка потенциальной способности источников газовой выделенной к оказанию повреждающего воздействия на элементы конструкций КА.

1.2 Параметры СВА, обусловленные газоаэрозольным выделением двигательных установок

Двигательные установки (ДУ) принято считать наиболее характерным представителем импульсных источников газовой выделенной СВА. Особенности ДУ как источника газовой выделенной определяются рядом моментов, которые можно отразить следующим образом [1-10]:

- исходными параметрами газовой выделенной ДУ являются массовые характеристики продуктов газовой выделенной (в отличие от рассмотренных выше источников непрерывного типа, у которых в качестве исходных параметров фигурировали объемные характеристики), определяемые режимами работы ДУ, в этом случае условными параметрами являются объемные характеристики, а не массовые, как это имело место в предыдущих разделах;
- отнесение ДУ к импульсным источникам газовой выделенной в определенной мере можно считать условным, если принять во внимание процессы вторичной десорбции газовых компонент продуктов сгорания и продувок ДУ с поверхности КА.

Оставляя в стороне обсуждение механизмов вторичной десорбции, можно отметить, что период вторичной дегазации от единичных импульсов ДУ может составлять по порядку величины $4 \cdot 10^3$ ч. При этом параметры вторичной дегазации сравнимы по порядку величины с параметрами газовой выделенной конструктивных материалов КА:

- вследствие вышеизложенного при рассмотрении повреждающего воздействия продуктов газовой выделенной ДУ на элементы конструкций КА следует учитывать как газовые потоки, непосредственно исходящие от ДУ, так и потоки вторичной десорбции продуктов сгорания ДУ. Последние могут иметь химический состав, отличный от первоначального;

- на первый взгляд может представиться, что ограниченный (априорно известный) парциальный состав газовых компонент газовой выделенной ДУ полностью снимает проблему оценки повреждающего воздействия газовой выделенной ДУ на элементы конструкций КА. Однако здесь уместно сделать ряд замечаний, имеющих общий характер независимо от конкретных режимов работы ДУ и используемых топливных компонент.

Во-первых, рассматривая ДУ в качестве источника газовой выделенной, способного оказать повреждающее воздействие, следует учитывать не только его газовые характеристики в активном режиме, но и в переходном, отражающем начальные и конечные фазы факелообразования (для ряда ДУ соотношение длительности активного и переходного режимов близко к единице). В переходных же режимах парциальный состав газовых сред ДУ существенно расширяется. Последнее обстоятельство привлекает к себе серьезное внимание, поскольку большинство газовых компонент ДУ в переходных режимах находятся в возбужденном, ионизированном либо в свободнорадикальном состоянии и в этой связи обладают высокой химической реакционной способностью.

Во-вторых, представление о парциальном составе газовой выделенной ДУ следует рассматривать несколько шире, нежели в рамках газовой выделенной собственно продуктов сгорания ДУ. Сюда же следует отнести продукты продувки ДУ (в том числе газовые компоненты, находящиеся в метастабильном состоянии) и продукты термического испарения конструкционных материалов, расположенных в высокотемпературной зоне ДУ.

При проведении работ, связанных с оценкой повреждающего воздействия СВА на элементы конструкций КА, необходимы детальные пространственно-временные характеристики газовых потоков, составляющих суть СВА. Здесь идет речь не об уточнении диаграмм направленности ДУ, используемых в баллистических расчетах (как правило, выбор пространственной ориентации ДУ проводится с учетом устранения его прямого влияния на элементы конструкций КА), а об определении простран-

венно-временных характеристик газовых потоков, распространяющихся по свободномолекулярному механизму с внешней границы факела ДУ.

Это обстоятельство позволяет допустить существование газовых потоков ДУ, воздействующих непосредственным образом (а не посредством процессов вторичной десорбции) на элементы конструкции КА. Указанные выше моменты свидетельствуют о многоаспектности и трудности работ, связанных с оценкой вклада газовой выделенности ДУ в СВА и определением его повреждающего воздействия на элементы конструкции КА.

Следует отметить, что при работе ДУ помимо газообразных выделяются и конденсированные продукты в виде аэрозолей.

1.3 Методы оценки обобщенных параметров СВА, обусловленных газовой выделенностью ДУ

1.3.1 Суммарная масса продуктов газовой выделенности ДУ

На первый взгляд, определение суммарной массы продуктов газовой выделенности ДУ не вызывает трудностей. В частности, можно приравнять суммарную массу газовой выделенности к общей массе топлива (горючее и окислительное). Однако это можно сделать лишь в первом приближении для сравнительно мощных ДУ при достаточно длительных импульсах активной фазы ДУ. Последнее объясняется рядом моментов:

- при продувании топливных магистралей непрореагировавшие топливные компоненты в результате адиабатического расширения в вакуум конденсируются в твердые и жидкие продукты (по ряду данных достаточно стабильные и долгоживущие.) Следовательно, эта часть продуктов должна быть исключена из общей массы продуктов газовой выделенности. В зависимости от режимов функционирования КА она может составить от 0,5 до 2 % полной массы топливных компонент;

- показано, что при работе двигателей малой тяги (стабилизация, программные повороты) соотношение продолжительностей активного и переходного режимов может быть равным единице. В переходном режиме об упомянутых выше конденсированных фазах, наблюдаются весьма устойчивые жидкие фазы неизвестного состава. Для указанных ДУ запланированный расход топлива может составлять $\sim 30-50\%$ от суммарного запаса топлива. Специфика режимов эксплуатации ДУ малой тяги (продолжительность активного режима $0,05 - 10$ с; количество импульсов $\sim 5 \cdot 10^5$) допускает конденсацию топливных компонент в количестве $15-25\%$ от запланированного запаса;
- с точки зрения оценки повреждающего воздействия СВА, вызывает сомнение правомерность и целесообразность учета всей массы продуктов газовой выделенной, поскольку космическое пространство выступает в качестве весьма эффективного откачного средства (скорость откачки $1,2 \cdot 10^5$ л.м²с⁻¹). В этой связи уместно рассматривать только ту часть продуктов газовой выделенной, которая непосредственно воздействует (в виде прямых и возвратных потоков) на элементы конструкций КА. Однако решение этого вопроса не представляется возможным на сегодняшний день.

Рассмотренные моменты свидетельствуют о некоторой однозначности вопроса о суммарной массе продуктов газовой выделенной ДУ. В этой связи уместно принять в качестве суммарных массовых характеристик следующий ряд параметров, отражающих конкретные физические представления как об СВА в целом, так и ее повреждающем действии на элементы конструкций КА:

m_0 – суммарная масса потенциально возможных продуктов газовой выделенной ДУ, численно равная полной массе топлива и окислителя;

$$m_p = m_0(1 - \gamma), \quad (1.3.1)$$

где $\gamma < 1$;

γ – реальная суммарная масса продуктов газовой выделения ДУ, равная γ_0 за вычетом массы продуктов в конденсированной фазе. Очевидно, что параметр γ (коэффициент конденсации) зависит от типа ДУ и режимов его работы и может быть оценен эмпирическим путем:

$$m_n = K_n m_p, \quad (1.3.2)$$

где $K_n \leq 1$ – суммарная масса продуктов газовой выделения ДУ, достигающая непосредственным образом поверхности КА. Параметр K_n (коэффициент прямых потоков) зависит от характеристик факела ДУ и его пространственной ориентации. (Поскольку выбор пространственной ориентации ДУ производится с учетом минимизации прямых потоков газовой выделения, параметр K_n характеризует ту часть продуктов газовой выделения, которая берет свое начало с внешней поверхности факела ДУ и распространяется в КП по свободномолекулярному механизму);

$$m_b = K_b m_p, \quad (1.3.3)$$

где $K_b < 1$ – суммарная масса продуктов газовой выделения ДУ, достигающая поверхности КА в виде возвратных потоков, появляющихся в результате отражения прямых потоков от атмосферы КП. Очевидно, что коэффициент возврата K_b является функцией орбиты КА.

Таким образом, с точки зрения повреждающего воздействия СВА суммарную массу продуктов газовой выделения ДУ можно представить в виде

$$m_n = (K_n + K_b) m_p, \quad (1.3.4)$$

где m_n – суммарная масса продуктов газовой выделения ДУ, способных оказать повреждающее воздействие на элементы конструкций КА. В соответствии с вышеизложенным, необходимым этапом в определении m_n является проведение работ по паспортизации параметра K_n для типовых режимов эксплуатации ДУ и определение функциональной зависимости параметра K_b от параметров полета КА и характеристик газовой выделения ДУ.

1.3.2 Суммарная и импульсная массовые скорости газовой выделения ДУ

Определим суммарную массовую скорость ДУ как усредненную по всей продолжительности функционирования КА скорость газовой выделения. Поскольку ДУ является импульсным источником газовой выделения, вышеизложенный параметр является условной характеристикой и в этой связи может оказаться полезным только для сравнительной оценки интенсивностей непрерывных и импульсных источников газовой выделения.

В соответствии с классификацией параметров, характеризующих суммарную массу газовой выделения ДУ, можно ввести рассмотрение пять разновидностей массовой скорости газовой выделения ДУ:

$$m_{co}=m_o/\tau, \quad (1.3.5)$$

$$m_{cp}=m_p/\tau, \quad (1.3.6)$$

$$m_{ch}=m_n/\tau, \quad (1.3.7)$$

$$m_{cb}=m_b/\tau, \quad (1.3.8)$$

$$m_{ch}=m_n/\tau, \quad (1.3.9)$$

где τ – продолжительность функционирования КА. Физический смысл приведенных параметров скорости газовой выделения становится ясным после рассмотрения массовых характеристик газовой выделения ДУ, представленных в разделе 1.3.1.

С точки зрения оценки повреждающего воздействия газовой выделения ДУ наибольший интерес представляет суммарная скорость m_{cp} . Обусловленная вторичной десорбцией продуктов газовой выделения ДУ с поверхности КА, она по своей физической природе является тождественной скорости газовой выделения конструкционных материалов. Именно в этой связи этот параметр может быть использован наиболее эффективным образом при проведении сравнительного анализа интенсивностей упомянутых источников газовой выделения.

Помимо рассмотренных суммарных характеристик скорости газовой выделенной ДУ, в ряде практических случаев представляют интерес импульсные скорости газовой выделенной определяемые соотношением

$$m_{cn} = m_n / \tau, \quad (1.3.10)$$

где m_{cn} – суммарная масса продуктов газовой выделенной, выпускаемая ДУ в процессе единичного импульса работы; τ_n – продолжительность.

1.3.3 Объемные характеристики газовой выделенной ДУ

Был рассмотрен ряд замечаний относительно условности перехода от объемных характеристик к концентрационным (массовым), обусловленного неравновесностью рассматриваемых газовых сред. Эти замечания становятся еще более значительными при рассмотрении параметров газовой выделенной ДУ, имеющего ярко выраженный векторизованный характер. В этой связи, приводимые ниже объемные характеристики газовой выделенной ДУ, основанные на использовании уравнения газового состояния, следует рассматривать в качестве характеристик, удобных для проведения сравнительного анализа различных источников газовой выделенной КА.

1.4 Пример оценочного расчета обобщенных параметров СВА, обусловленной газовой выделенной ДУ

1.4.1 Постановка вопроса

Оценочный расчет параметров СВА, обусловленной газовой выделенной ДУ, проводится на примере конкретного типа КА. Предметом рассмотрения являются обобщенные параметры, а именно массовые и объемные характеристики вклада газовой выделенной ДУ в СВА в целом. Определение пространственно-

временных характеристик СВА, обусловленной газовой выделением ДУ, в настоящее время не представляется возможным по причинам, изложенным в разделе 1.2.

Наибольший практический интерес представляют оценки, проведенные под углом зрения повреждающего воздействия СВА. В этой связи наибольшую значимость приобретают рассмотренные выше параметры m_p , K_n , K_b . Отсутствие достоверных исходных данных, характеризующих физико-химические процессы в переходных режимах работы ДУ и интенсивности газовых потоков, распространяющихся по свободномолекулярному механизму от внешней поверхности факелов ДУ в переходном и активном режимах, предполагает развитие ряда гипотез, упрощающих и определяющих постановку задачи.

В данном разделе в качестве исходных гипотез приняты следующие допущения:

- продолжительность переходного режима τ_n работы ДУ принимается равной минимальной продолжительности импульсов конкретной ДУ;
- парциальный состав продуктов газовой выделенной ДУ в переходном режиме идентичен парциальному составу исходных топливных смесей;
- суммарная масса газовой выделенной m_p принята равной m_0 (не учитывается конденсированная фаза продуктов выхлопа ДУ);
- продолжительность импульсов активного режима τ_a работы ДУ принимается равной среднему значению от заданного интервала длительностей активных режимов;
- массы прореагировавших и непрореагировавших топливных смесей соотносятся как τ_a / τ_n ;
- численное значение коэффициента K_n принимается равным 10^{-2} ;
- численное значение коэффициента K_b принимается равным 10^{-2} ;
- стехиометрический состав газовых компонент соответствует паспортным режимам функционирования ДУ;

- средняя температура газовых компонент продуктов сгорания принята равной : 2000°С (для УРД); 3000°С (для КТД).

Таблица 1.1. Состав и режимы работы комплексной двигательной установки низкоорбитального КА конкретного типа

№ п/п	Тип двигателя	Название двигателя	Кол-во, шт.	Режим работы	Суммарное количество импульсов (1)
1	КТД	Коррекция орбиты КА	1	Не реже 1 раза в трое суток	10..20
2	УРД-1	Стабилизация пространственной ориентации КА	8	В среднем 1 цикл на 1,5 витка обращения КА	Не нормируется (порядка 300000)
3	УРД-2	Программные повороты КА	4	25 циклов в течение суток	Не нормируется (порядка 100000)

Примечание. Приведены ориентировочные данные, усредненные по совокупности эксплуатационных режимов изделий данного типа.

Таблица 1.2. Характеристики массовыделения комплексной двигательной установки низкоорбитального КА конкретного типа

№ п/п	Тип двигателя	Суммарный расход (масса) топлива, кг	Массовыделение за один импульс, кг	Длительность импульса, с	Импульсная скорость массовыделения, кг/с	Скорость истечения газов, м/с
1	КТД	400	2,1 – 105	2...100	1,05	2880
2	УРД-1	40	1,1e-4...0,02	4,5e-2...9	2,60E-03	2000
3	УРД-2	160	1,0e-3...0,22	4,5e-2...9	2,40E-02	2000

1.4.2 Исходные характеристики, использованные при проведении оценочного расчета

В качестве исходных данных, необходимых для проведения оценочного расчета комплексной двигательной установки (КДУ), рассматриваются:

- общие физико-химические характеристики;
- состав и режимы работы КДУ;
- параметры массовыделения КДУ.

В рассматриваемой конкретной постановке к общим физико-химическим характеристикам следует отнести:

- суммарный расход топлива $m_0 = 600$ кг (в период активного существования);
- массовый состав топлива: горючее – 390 кг; окислитель – 210 кг;
- химический состав топлива: горючее $(\text{CH}_3)_0_2\text{N}_2\text{H}_2$, окислитель N_2O_4 ;
- молекулярный вес продуктов сгорания при массовом (стехиометрическом) соотношении между горючим и окислителем равном 1,85, $M_0 = 20,6$;
- равновесный парциальный состав продуктов сгорания (концентрация в относительных единицах): H_2 – 29%; H_2O – 20%; CO_2 – 15%; CO – 9%; N_2 – 26%; NO – 1%;
- суммарная масса непрореагировавшего топлива, выбрасываемого в КП после выключения корректирующего тормозного двигателя (КТД) – 0,5 кг.

Состав, режимы работы и параметры массовыделения КДУ представлены в табл. 1.1 и 1.2.

1.4.3 Суммарная масса продуктов газовойделения ДУ

Методология оценки суммарной массы продуктов газовойделения ДУ приведена в разделе 1.3.1.

В соответствии с принятыми допущениями и исходными данными для характеристик газовойделения КДУ в целом имеем:

$$m_0 = m_p = 600 \text{ кг};$$

$$m_n = K_n m_p = 6 \text{ кг};$$

$$m_b = K_b m_p = 6 \text{ кг};$$

$$m_H = (K_n + K_b) m_p = 12 \text{ кг}.$$

Наибольший интерес представляет значение параметра m_n , характеризующее массу продуктов газовой выделения, способных оказать повреждающее воздействие на элементы конструкций КА.

Вклад различных типов ДУ, входящих в состав КДУ, суммарную массу продуктов газовой выделения оценивают величинами:

КТД:

$$m_0 = 400 \text{ кг}; \quad m_n = 4 \text{ кг};$$

$$m_b = 4 \text{ кг}; \quad m_H = 8 \text{ кг};$$

УРД-1:

а) в целом: $m_0 = m_p = 40 \text{ кг}; m_n = 0,4 \text{ кг}; m_b = 0,4; m_H = 0,8 \text{ кг};$

б) на единственный двигатель: $m_0 = m_p = 5 \text{ кг}; m_n = 5 \cdot 10^{-2} \text{ кг}; m_b = 5 \cdot 10^{-2} \text{ кг}; m_H = 10^{-1} \text{ кг}.$

УРД-2:

а) в целом: $m_0 = m_p = 160 \text{ кг}; m_n = 1,6 \text{ кг}; m_b = 1,6; m_H = 3,2 \text{ кг};$

б) на единственный двигатель: $m_0 = m_p = 20 \text{ кг}; m_n = 2 \cdot 10^{-1} \text{ кг}; m_b = 2 \cdot 10^{-1} \text{ кг}; m_H = 4 \cdot 10^{-1} \text{ кг}.$

Данные по двигательным установкам типа УРД-2 усреднены по позициям № 3,4 (табл. 1.2).

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что 66% от общего газовой выделения приходится на долю КТД, в то время как продолжительность работы последних составляет по порядку величины 20-2000 с. (При полной продолжительности функционирования КА $2,6 \cdot 10^6$ с).

В этой связи в качестве первоочередного шага по уменьшению повреждающего воздействия газовой выделения КТД на элементы конструкций КА может явиться разработка конструктивных и организационных принципов, обеспечивающих снижение прямых и возвратных потоков от КТД.

1.4.4 Суммарная и импульсная массовые скорости газовойделения ДУ

Методика определения массовых скоростей газовойделения приведена в разделе 1.3.2. (Продолжительность функционирования КА в активном режиме принята равной $\tau = 720$ ч.)

Для скоростей газовойделения КДУ в целом имеем:

$$m_{CO} = m_{CP} = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с};$$

$$m_{СИ} = m_{СВ} = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с};$$

$$m_{СИ} = 4,6 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с}.$$

Средняя скорость газовойделения различных типов ДУ, входящих в состав КДУ, оценивается значениями:

КДТ:

$$m_{CO} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с}; m_{СИ} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с}.$$

УРД-1:

а) в целом: $m_{CO} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}; m_{СИ} = 3 \cdot 10^{-7} \text{ кг/с};$

б) на единственный двигатель: $m_{CO} = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с};$

$m_{СИ} = 3,8 \cdot 10^{-8} \text{ кг/с}.$

УРД-2:

а) в целом: $m_{CO} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}; m_{СИ} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с}.$

б) на единственный двигатель: $m_{CO} = 7,7 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с};$

$m_{СИ} = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ кг/с}.$

Импульсные скорости газовойделения для различных типов ДУ приведены в табл. 1.2.

1.4.5 Объемные характеристики газовойделения ДУ

Определение суммарного объема продуктов газовойделения ДУ проводится в соответствии с методикой, рассмотренной в разделе 1.3.3.

Поскольку масса непрореагировавшего топлива существенно уступает полной массе топлива, средний молекулярный вес

газовых компонент газовой выделения ДУ может быть принят равным $M_0 = 20,6$ (см. раздел 1.4.2).

Суммарный объем Q_0 и объемная скорость газовой выделения Q_{CH} в целом по КТД составляют (при $T = 2000^\circ\text{C}$):

$$Q_0 = 4,8 \cdot 10^8 \text{ Па} \cdot \text{м}^3; \quad Q_{CH} = 180 \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}.$$

Суммарный объем Q_H и объемная скорость Q_{CH} той части продуктов газовой выделения КДУ, которая может оказать повреждающее воздействие на элементы конструкций КА, соответственно составляют:

$$Q_H = 9,6 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{м}^3; \quad Q_{CH} = 3,6 \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}.$$

С целью расширения круга представлений о характеристиках газовой выделения ДУ интересно оценить порядок величины импульсных объемных характеристик различных типов двигательных установок в соответствии с исходными данными, представленными в табл. 1.1.

Согласно заданным нами данным табл. 1.3, объем газовой выделения от единичного импульса работы ДУ может на три порядка превышать суммарный объем газовой выделения конструкционных материалов КА.

1.4.6 Парциальный состав продуктов газовой выделения ДУ

В первом приближении можно принять, что молекулярный состав продуктов газовой выделения ДУ определяется составом продуктов сгорания и топливной смеси. (Не учитывается молекулярный состав газовых компонент, находящихся в метастабильном состоянии, и промежуточных конденсированных фаз).

Для определения парциального состава, с учетом оговоренного выше допущения, необходимо оценить суммарную массу прореагировавших и непрореагировавших топливных реагентов. Появление непрореагировавших реагентов обусловлено:

- продувкой топливных магистралей КТД;
- работой ДУ в переходных режимах.

Таблица 1.3. Расчетные импульсные объемные характеристики газовыделения различных типов ДУ, входящих в состав КДУ

Тип двигательной установки	Импульсный объем газовыделения $Q_n, \text{Па}\cdot\text{м}^3$	Импульсная скорость газовыделения $Q_{cn} \text{Па}\cdot\text{м}^3\cdot\text{с}^{-1}$
R_1	$2,5\cdot 10^6 \dots 1,2\cdot 10^8$	$1,2\cdot 10^6$
R_2	$9,4\cdot 10^1 \dots 1,8\cdot 10^4$	$2,2\cdot 10^3$
R_3	$8,6\cdot 10^2 \dots 1,9\cdot 10^5$	$1,9\cdot 10^4$
R_4	$1,5\cdot 10^3 \dots 3,0\cdot 10^5$	$3,4\cdot 10^4$

В первом случае максимальная суммарная масса определяется выражением

$$m_{\text{нп.1}} = m'_{\text{нп}} n, \quad (1.4.1)$$

где $m'_{\text{нп}}$ – масса непрореагировавшего топлива, появляющаяся после выключения КТД;

n – максимальное количество включений КТД.

Для рассматриваемого случая $m_{\text{нп.1}} = 10$ кг.

Во втором случае суммарная масса $m_{\text{нп.2}}$ определяется на основании использования некоторых допущений, а именно, для каждого типа двигательной установки:

$$m_{\text{нп.2}} = m \tau_n / \tau_a, \quad (1.4.2)$$

где m – полная масса, расходуемая данным типом ДУ;

τ_n – продолжительность переходного режима работы данной ДУ, принятая равной минимальной продолжительности активного режима;

τ_a – средняя продолжительность работы ДУ в активном режиме (см. табл. 1.2).

Рассчитанное значение $m_{\text{нп}2}$ по всем типам ДУ составляет 18 кг. (Следует отметить, что на долю КТД приходится 16 кг от суммарного значения $m_{\text{нп}1}$).

Таким образом, полная масса непрореагировавших реагентов $m_{\text{нп.с}}$ определяется очевидным выражением:

$$m_{\text{нп.с}} = m_{\text{нп}1} + m_{\text{нп}2} \quad . \quad (1.4.3)$$

Для рассматриваемого типа КТД она составляет 28 кг. В основу приведенных результатов положено значение суммарной массы газовыделения $m_0 = 600$ кг.

С точки зрения оценки повреждающего воздействия газовой выделенной ДУ на элементы конструкций КА представляет интерес определение численного значения параметра $m_{\text{нп.с}}$ на основании параметра $m_n = 12$ кг. Для этого случая $m_{\text{нп.с}} = 5,6 \cdot 10^{-1}$ кг.

Данные по парциальному составу (массовое) непрореагировавших реагентов, полученные на использовании исходных характеристик, можно посмотреть в нижеприведенной таблице.

Суммарная масса прореагировавших реагентов определяется согласно выражению

$$m_{\text{пр}} = m - m_{\text{нп.с}} \quad , \quad (1.4.4)$$

где m – суммарная масса (соответственно m_0 или m_n);

$m_{\text{нп.с}}$ – масса непрореагировавших реагентов, определенная выше для вариантов исходных данных m_0 или m_n .

Для рассматриваемого типа КДУ значения $m_{\text{пр}}$ составляют:

$m_{\text{пр}} = 572$ кг (вариант использования m_0);

$m_{\text{пр}} = 11,44$ кг (вариант использования m_n).

Массовый парциальный состав продуктов сгорания КДУ определяется согласно выражению

$$m_i = P_i N M_{oi} m_a \quad , \quad (1.4.5)$$

где m_i – суммарная масса газовой компоненты i -го типа;

M_{oi} – молекулярный вес газовой компоненты i -го типа;

P_i – относительная концентрация газовых молекул i -го типа, рассмотренная в разделе 1.4.2;

N – полное количество газовых молекул продуктов сгорания КДУ.

Оно определяется согласно выражению

$$N = m_{np} (m_a \sum P_i M_{oi})^{-1}, \quad (1.4.6)$$

где m_a – атомная единица массы;

$\sum P_i M_{oi}$ характеризует средний молекулярный вес продуктов сгорания, равный для рассматриваемого типа топливных смесей $M_o = 20,6$.

Результаты количественной оценки параметров m_i для рассматриваемого типа КДУ приведены в табл. 1.5.

Приведенные данные (см. табл. 1.4 и 1.5, позиция 2) характеризуют массовый парциальный состав продуктов газовой выделенной ДУ, способных оказать повреждающее воздействие на элементы конструкций КА. Следует отметить, что достоверность полученных результатов определяется правомочностью использования допущений значений параметров K_n и K_v , положенных в основу определения параметра m_n .

Таблица 1.4. **Массовый парциальный состав непрореагировавших реагентов**

Исходный параметр суммарного газовой выделенной ДУ	$m_{np,с},$ кг	Масса реагентов, кг	
		горючее N_2O_4	окислитель $(CH_3)_2N_2H_2$
$m_0 = 600$ кг	28	15,1	12,9
$m_n = 12$ кг	0,56	0,30	0,26

Таблица 1.5. **Массовый парциальный состав продуктов сгорания КДУ**

Исходный параметр суммарного газовой выделенной ДУ, кг	Масса продуктов сгорания, кг						$m_{np},$ кг
	H_2	H_2O	CO_2	CO	N_2	NO	
$m_0 = 600$	16	99	181	69	199	8	572
$m_n = 12$	0,32	1,98	3,96	1,38	3,98	0,16	11,4

1.5 Модели распределения плотности в поле течения струи ДУ

Для определения параметров СВА необходимы сведения о характеристиках источников массы. Сложности их установления связаны с описанием таких процессов, как массоотделение реальных поверхностей ЛА в условиях воздействия многочисленных факторов космического пространства, расширение в вакуум струй двигательных установок, испарение воды и т.д. В этих случаях часто предпочтение отдается применению простых моделей для описания как процессов массопереноса, так и источников массы.

Приближенные методы расчета параметров газа при истечении в пустоту можно разделить на три группы [25]. К первой группе относятся методы, основанные на тех или иных физических моделях течения в струе, ко второй – методы, использующие аппроксимации результатов численных расчетов, к третьей – смешанные методы. Как правило, приближенные методы предназначены для расчета течения на больших расстояниях от сопла. Для построения расчетной схемы используется асимптотический характер течения в дальнем поле струи.

Более точными являются методы, аппроксимирующие результаты численных расчетов. В работе [26] была предложена аппроксимация поля-струи, истекающей из звукового сопла. Для числа M на оси и плотности в поле течения получены выражения:

$$M = A \left(\frac{x-x_0}{d_a} \right)^{\gamma-1} - \frac{1}{2} \left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1} \right) \left[A \left(\frac{x-x_0}{d_a} \right)^{\gamma-1} \right]^{-1};$$
$$\frac{\rho}{\rho_0} = B \cos^2 \left(\frac{\pi\theta}{2C} \right) \left(\frac{r}{d_a} \right)^{-2}. \quad (1.5.1)$$

Здесь x_0 – параметр, характеризующий расстояние от полюса воображаемого источника до среза сопла; ρ_0 – плотность торможения. Значения параметров A , B , C , X_0 даны в виде табл. 1.6.

Таблица 1.6. Значения параметров А, В, С, X₀

γ	А	В	С	X ₀
5/3	3,26	0,643	1,365	0,075
7/5	3,65	0,357	1,662	0,40
9/7	3,96	0,246	1,888	0,85

Согласно [26], точность аппроксимации для числа М не хуже 1%, для плотности – 3-4%.

В работах [24,29] предложен приближенный метод расчета параметров в дальнем поле свободно расширяющейся струи идеального совершенного газа, основанный на аппроксимации результатов численных исследований. В основу расчета положена автомодельность поперечных профилей приведенной интенсивности:

$$\varphi = \frac{q(M)}{q(M_a)} \bar{r}^2, \quad (1.5.2)$$

где $q(M) = \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} M \left(1 + \frac{\gamma+1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$ – безразмерная газодинамическая функция расхода; $\bar{r} = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$ – расстояние от полюса до источника; x и y отнесены к r_a . Приведенная интенсивность существенно изменяется от одной линии к другой. Поскольку течение вдоль каждой линии тока струи асимптотически приближается к течению в фиктивном источнике, φ вдоль линии тока стремится к некоторому пределу.

На основании анализа результатов численных расчетов установлено, что значение φ на оси симметрии практически не зависит от M_a и при $M_a > 2$ определяется по формуле:

$$\varphi_s = \left[\frac{m(\gamma)}{\vartheta_m} \right]^2 \quad (1.5.3)$$

Результаты можно использовать для определения плотности газа. Поскольку речь идет о дальнем поле струи, где скорость близка к своему термодинамическому пределу, распределение плотности определяется из следующих соотношений:

$$\frac{\rho_s}{\rho_a} = \varphi_s \frac{\lambda_a}{\lambda_m} \bar{x}^{-2}; \quad \frac{\rho}{\rho_s} = \frac{\varphi}{\varphi_s} \cos^2 \theta \quad (1.5.4)$$

Здесь λ_a и λ_m – коэффициент скорости на срезе сопла и его термодинамический предел; ρ_s – плотность на оси струи.

Примером приближенного описания источника массы – струи двигательной установки, является модель [7,8], приведенная на рис.1.1. Она описывает расширение струи при наличии значительного по толщине пограничного слоя на стенке сопла. Такие ситуации характерны для исполнительных органов системы управления ЛА. Модель Симонса является обобщением результатов численных расчетов, в которых рассматривалась задача о распределении параметров газа в струе, но не учитывалось влияние вязкости газа на течение газа за срезом сопла.

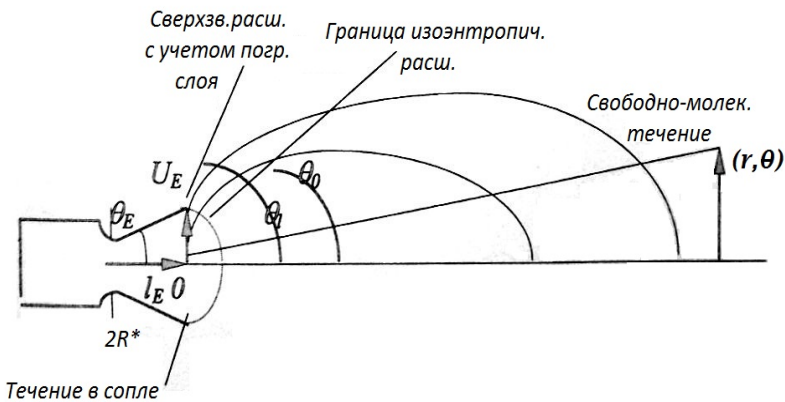


Рис. 1.1. Модель расширения струи ДУ

Вдали от ракеты газ расширяется радиально, как при истечении из точечного источника. Плотность газа ρ определяется из соотношения

$$\frac{\rho}{\rho^*} = A \frac{R^*}{r} f(\theta), \quad (1.5.5)$$

где r – радиус сферы; R^* – радиус минимального сечения сопла, угол θ измеряется от оси струи; A – константа, определяемая из условия сохранения массового расхода двигателя,

$$A = \frac{U^*/2U_L}{\int_0^{\theta_L} \sin\theta \, d\theta}; \quad (1.5.6)$$

θ_L – предельный угол поворота газа на срезе сопла, U^* – критическая скорость газа, U_L – максимальная скорость газа, равная:

$$U_L = \left[\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \right]^{1/2} U^*. \quad (1.5.7)$$

Подобно функции $f(\theta)$ для невязкого течения уделялось значительное внимание. Результаты численных расчетов показывают, что для $f(\theta)$ лучше всего подходит закон косинуса:

$$f(\theta) = \cos^{\frac{2}{\gamma-1}} \left[\frac{\pi}{2} \frac{\theta}{\theta_\infty} \right], \quad (1.5.8)$$

где θ_∞ – значение θ_L для невязкого сверхзвукового потока.

Рассматривая влияние пограничного слоя сопла, Бойнтон [9] указал на большие отличия от соотношений θ вблизи θ_∞ . Закон косинуса справедлив для значений θ , меньших некоторого θ_0 , а для больших значений справедлив экспоненциальный закон:

$$f(\theta) = f(\theta_0) e^{-\beta(\theta-\theta_0)}, \quad (1.5.9)$$

где β – постоянная.

Величины θ_0 , θ_∞ и δ – толщина пограничного слоя, можно связать соотношением

$$\frac{\theta_0}{\theta_\infty} \approx 1 - \frac{2}{\pi} \left(\frac{2\delta}{R_e} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}, \quad (1.5.10)$$

где R_e – радиус среза сопла.

Величины β и δ связаны выражением

$$\beta = A \left[\frac{\gamma+1}{\gamma-1} \right]^{1/2} \frac{2\bar{U}_L}{U_L} \left[\frac{R_e}{2\delta} \right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma+1}}, \quad (1.5.11)$$

где U_L – средняя максимальная скорость газа в пограничном слое. Ее можно определить из соотношения:

$$\bar{U}_L \approx \alpha U_L, \quad (1.5.12)$$

где $0,5 < \alpha < 1$.

Для числа Маха $M_e \approx 3$, $\delta/R_e \approx 0,016$, $\gamma \approx 1,27$, $\bar{U}_L \approx 0,75U_L$.

В этом случае $f(\theta_\infty) \approx 0,5$, $\beta \approx 6,3$.

Наибольшее распространение в расчетной практике получило аппроксимационное выражение для плотности в дальнем поле течения струи в виде [19]

$$\frac{\rho_c}{\rho_a} = \frac{k}{2} \left(\frac{R}{r_a} \right)^{-2} (\cos\theta)^k, \quad (1.5.13)$$

где $k = \gamma(\gamma - 1)M_a^2$; R – расстояние от точки в поле течения до центра выходного сечения сопла; r_a – радиус выходного сечения сопла; θ – полярный угол; γ – отношение удельных теплоемкостей; индексы с и а – соответственно параметры в струе и на срезе сопла.

Используя (1.5.13), можно получить все газодинамические величины изоэнтропического течения в струе. В частности, для числа Маха можно получить выражение

$$M_c = \left(\frac{2}{\gamma-1} \right)^{1/2} \left\{ \left[\frac{k}{2} \varepsilon(M_a) \left(\frac{r_a}{R} \right)^2 (\cos\theta)^k \right]^{1-\gamma} \right\}^{1/2}, \quad (1.5.14)$$

где $\varepsilon(M_a) = \frac{\rho_a}{\rho_0}$, где индекс (0) означает условие торможения.

Сравнение результатов численного расчета числа M_c методом характеристик с результатами расчетов по формуле (1.5.14) показало, как и следовало ожидать, их хорошее соответствие на оси симметрии струи.

Расхождение результатов расчета наблюдалось с удалением от оси, особенно существенное в приосевой зоне вблизи среза сопла. Это расхождение было предложено уменьшить, домножив выражение (1.5.14) на подобранный эмпирическим путем коэффициент, равный $(\cos\theta)^{1/2}$.

На основании анализа результатов численных расчетов сверхзвуковых нерасчетных струй ранее в литературе были предложены аппроксимационные формулы для плотности:

$$\frac{\rho(x)}{\rho_a} = B_0(\gamma, M_a) \left(\frac{\gamma}{\Gamma_a}\right)^{-2} \left(\frac{\rho(x, y)}{\rho(x, 0)}\right) = (1 - n^2)^{\frac{2}{\gamma-1}}, \quad (1.5.15)$$

где $B_0 = \frac{\gamma^2-1}{4\gamma} (\gamma M_a^2 + 2)$;

$$n = \frac{y}{2x} (\gamma - 1) M_a \left(1 + \frac{2}{\gamma M_a^2}\right)^{1/2}.$$

В [20] для $M_a=1$ было учтено изменение интенсивности источника в зависимости от угла θ . При этом была получена формула

$$\frac{\rho_c}{\rho_a} = \left(\frac{\gamma-1}{\gamma+1}\right)^{1/2} \frac{\cos^2(\alpha\theta)}{\left(\frac{R}{R_p}\right)}, \quad (1.5.16)$$

где α – константа, характеризующая изменение интенсивности источника; R_p – расстояние от полюса источника до критического сечения на оси струи.

Используя переменные подобия, полученные в работе [22], Е.А. Лейтес установил функциональную зависимость для распределения скорости в дальнем поле струи [21]:

$$\rho = \frac{Q}{x^2 V_{\max} Q_*^2} \varphi\left(\frac{Q}{Q_*}\right), \quad (1.5.17)$$

где $Q_* = (1 - J_1)^{1/2}$;

$$J_1 = \frac{J}{Q V_{\max}} = \left(1 + \frac{1}{\gamma M_a^2}\right) \left(1 + \frac{2}{(\gamma-1) M_a^2}\right)^{-1/2};$$

Q – расход газа через сопло; J – импульс газа на срезе сопла; V_{\max} – максимальная скорость истечения; x – продольная координата.

Вид функции $\varphi\left(\frac{Q}{Q_*}\right)$ был установлен путем обработки результатов численных расчетов в переменных R, η :

$$R = \frac{\frac{\rho}{\rho_a} \left(\frac{x}{r_a}\right)^2 (1-J_1)}{\frac{V_a}{V_{\max}}}; \quad \eta = \frac{y}{x(1-J_1)^{1/2}}, \quad (1.5.18)$$

где r_a – радиус среза; y – поперечная координата. В диапазоне значений $0 \leq \eta \leq 2$ результаты точных численных расчетов группируются с небольшим разбросом около единой кривой, которую можно аппроксимировать параболой:

$$R(\eta) = -0,064 \eta^2 - 0,014 \eta + 0,375. \quad (1.5.19)$$

Обобщенный подход к определению чисел Ma и угла наклона линий тока в точках осесимметричной струи, достаточно удаленных от среза сопла, предложил В.А.Насекин. Полагая распределение параметров по срезу сопла равномерным, можно найти выражение для приведенной плотности потока массы газа в слое между двумя соседними трубками тока с координатами y_a, θ и $y_a + \Delta y_a, \theta + \Delta \theta$ в виде

$$\bar{q} = \frac{q}{q_a} = \frac{\frac{\sqrt{m}}{\bar{y}}}{\frac{2\bar{x}(\theta_{\max} + \delta)\sqrt{m}}{\cos\theta \frac{d\bar{m}}{d\theta} + \cos\bar{\theta}}}, \quad (1.5.20)$$

где $\bar{\theta} = \frac{\Theta}{\Theta_{\max} + \delta}$; θ_{\max} – максимальный угол поворота Прандтля-Майера при истечении газа в вакуум. Методика основывается на использовании независимости массового расхода \bar{m} газа в определенном сечении струи от числа Ma и угла полураствора сопла на срезе δ .

Проведенная дополнительная обработка результатов расчетов сверхзвуковых ($Ma = 1,0 - 5,0$) недорасширенных струй иде-

ального газа [23,24] подтверждает эту закономерность. Для значений γ , лежащих в диапазоне $\gamma = 1,15 - 1,667$, зависимость $\frac{\bar{m}}{m_0} = \bar{m}(\gamma, \bar{\Theta})$ хорошо аппроксимируется выражением:

$$\bar{m} = 1 - \exp[-(A+B\bar{\Theta})\bar{\Theta}^2], \quad (1.5.21)$$

где $A = 136,5C^2 - 7,1C + 6$;
 $B = (4,72D^2 + 0,287D - 0,19)^{-1}$;
 $C = x^{-2} - 0,35$;
 $D = x^{-2} - 0,54$;
 m_0 – полный массовый расход газа через сопло.

Угол наклона линии тока к оси струи предлагается уточнять методом последовательных приближений, полагая вначале

$$\theta^I = \arctg(y/x). \quad (1.5.22)$$

По величине θ^I с помощью выражения (1.5.21) можно найти $y_a^I = \sqrt{\bar{m}^I}$. При использовании второго приближения

$$\theta^{II} = \arctg\left(\frac{\bar{y} - \bar{y}_a^I}{\bar{x}}\right), \quad (1.5.23)$$

полагая $\bar{y}_a^{II} = \sqrt{\bar{m}^{II}}$ и т.д.

При больших значениях x и y оказывается достаточным не более одного-трех приближений.

В итоге с помощью (1.5.21) может быть найдена плотность потока массы \bar{q} . Используя выражения для газодинамической функции, значение числа Ма в любой точке находим с помощью решения трансцендентного уравнения:

$$\left(\frac{2+M_a^2(\gamma-1)}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} - M_a q = 0. \quad (1.5.24)$$

Максимальные погрешности вычислений числа Маха и тангенса угла наклона линий тока в сечениях струи, прилегающих к срезу сопла, достигают величины 15-20% по отношению к рас-

четам по методу характеристик. Для большинства начальных параметров и точек поля совпадение с расчетами по методу характеристик довольно хорошее и погрешности не превышают 10%, уменьшаясь (для всех методик) с увеличением расстояния от среза.

1.6 Методы расчета процессов массопереноса от источников, характерных для ДУ

1.6.1 Основополагающие представления

Аналитическое решение интегральных уравнений массопереноса возможно только в простых структурах. В более сложных приходится прибегать к численному интегрированию или зональному методу их решения. Широкое применение для анализа процессов массопереноса получил метод угловых коэффициентов. При помощи этого метода анализируется массообмен между эмитирующими и поглощающими поверхностями.

Рассмотрим произвольную структуру из нескольких поверхностей. Плотность потока молекул, покидающих площадку dF_i i -й поверхности вокруг точки с радиусом-вектором r_i :

$$v(r_i) = V_o(r_i) + \gamma(r_i) v_{\text{пад}}(r_i), \quad (1.6.1)$$

где $V_o(r_i)$ – плотность “собственного” потока молекул, создаваемого источником, если он есть на этой площадке; $v_{\text{пад}}(r_i)$ – плотность падающего на площадку потока; γ – коэффициент взаимодействия молекула-поверхность.

Используем понятие дифференциального углового коэффициента $d\varphi_{dF_j-dF_i}$. Придадим ему смысл доли потока, покидающего площадку dF_j в направлении площадки dF_i . Эта доля определяется телесным углом $d\Omega_{ij}$, под которым площадка dF_i видна с dF_j , и законом рассеяния молекул. При диффузном рассеянии:

$$d_{\varphi_{dF_j-dF_i}} = \frac{d\Omega_{ji}}{\pi} \cos\theta_j = \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi|r_i - r_j|^2} dF_i, \quad (1.6.2)$$

или

$$d_{\varphi_{dF_j-dF_i}} = K(r_i, r_j) dF_i, K(r_i, r_j) = \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi|r_i - r_j|^2}.$$

Поток молекул, покидающих площадку dF_j в направлении dF_i , есть $v(r_i) d_{\varphi_{dF_j-dF_i}} dF_j$, а полный поток на площадку dF_i определится суммированием по всем dF_j :

$$v_{\text{пад}}(r_i) dF_i = \int_{\Sigma_F} v(r_i) d_{\varphi_{dF_j-dF_i}} dF_j. \quad (1.6.3)$$

Соответственно плотность потока на эту площадку:

$$v_{\text{пад}}(r_i) = \int_{\Sigma_F} v(r_i) K(r_i, r_j) dF_j. \quad (1.6.4)$$

Подставив это выражение в (1.6.1), найдем интегральное уравнение для плотности потока молекул, покидающих площадку dF_j :

$$v(r_i) = v_0(r_i) + \gamma(r_i) \int_{\Sigma_F} v(r_i) K(r_i, r_j) dF_j. \quad (1.6.5)$$

Интегрируя по всей поверхности F_i , получаем локальный угловой коэффициент:

$$d_{\varphi_{dF_j-dF_i}} = \int_{F_i} K(r_i, r_j) dF_i, \quad (1.6.6)$$

определяющий вероятность молекулярного обмена между площадкой dF_j и поверхностью F_i . Полагая, что $v(r_j) = \text{const}$ и интегрируя по всей поверхности F_j , получаем средний угловой коэффициент, определяющий вероятность молекулярного обмена между поверхностями F_i и F_j :

$$\varphi_{F_j-F_i} = \frac{1}{F_j} \int_{F_j} dF_j \int_{F_i} K(r_i, r_j) dF_i. \quad (1.6.7)$$

Условие $v(r_j)=\text{const}$ обычно не выполняется. В этом случае j -ю поверхность разбивают на p зон, в пределах каждой из которых это условие можно считать выполненным.

Введенные угловые коэффициенты (УК) определяются только геометрическими характеристиками системы. Будем называть их поэтому геометрическими.

Геометрические УК обладают следующими свойствами:

- аддитивность:

$$\varphi_{F_j-F_i} = \sum_{k=1}^n \varphi_{F_j-F_{ik}}, \quad F_i = \sum_{k=1}^n F_{ik}; \quad (1.6.8)$$

- взаимность:

$$\varphi_{F_j-F_i} F_j = \varphi_{F_i-F_j} F_i; \quad (1.6.9)$$

- замкнутость:

$$\sum_{i=1}^n \varphi_{F_j-F_i} = 1. \quad (1.6.10)$$

Вернемся к уравнению (1.6.5), применив для его решения зональный метод. Положим, что плотности потоков $v(r_j)$ и параметры $\gamma(r_j)$ во всех точках каждой из m зон (поверхностей) одинаковы. В этом случае (1.6.5) можно переписать в форме

$$v_i = v_{0i} + \gamma \sum_{j=1}^m \varphi_{j-i} v_j, \quad (1.6.11)$$

где v_i, v_j – плотности полного потока молекул, эмиттируемых i -й и j -й поверхностями; v_{0j} – плотность «собственного» потока молекул с i -й поверхности, например потока десорбции; здесь и далее для упрощения записи обозначение радиуса-вектора опущено. Будем считать, что v_{0i} и γ_i для всех поверхностей заданы и УК известны. Решение системы для i -й поверхности дает:

- плотность потока молекул, падающих на эту поверхность:

$$v_{\text{пад } i} = \sum_{j=1}^m \varphi_{j-i} v_j = \frac{v_i - v_{0i}}{\gamma_i}; \quad (1.6.12)$$

- плотность потока молекул, поглощаемых поверхностью:

$$v_{\text{пог } m} = (1 - \gamma_i)v_{\text{пад } i}; \quad (1.6.13)$$

- плотность потока отражаемых молекул (в общем случае может быть как меньше, так и больше первичного падающего потока):

$$v_{\text{отр } i} = \gamma_i v_{\text{пад } i} = v_i - v_0. \quad (1.6.14)$$

Прозрачные для молекул элементы конструкций, например отверстия, трактуются как условные поверхности, создающие десорбционный поток и имеющие параметр $\gamma=0$.

Определенные по формуле (1.6.12) величины $v_{\text{пад}}$ дают пространственное распределение плотности падающих молекулярных потоков. Решая систему (1.6.11), можно построить также поле молекулярных концентраций и т.п.

На рис. 1.2 приведена схема для расчета частиц, стартующих с площадки А (и рассеиваемых частицами набегающего потока), которые поступают на площадку А' [1]. Элементарная плотность потока частиц, рассеянных в элементе dV набегающим потоком и попадающих на А', равна:

$$dN = N_0 \frac{A}{A'} \cos\theta \cdot d\omega \cdot \exp\left(-\frac{r}{1}\right) \frac{\omega'}{4\pi} \frac{dr}{1}. \quad (1.6.15)$$

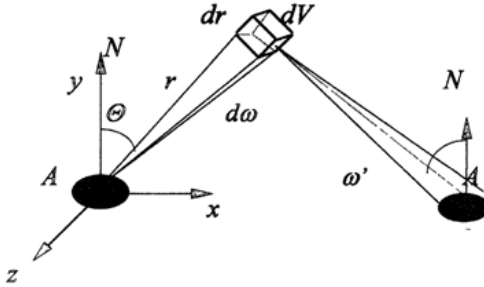


Рис. 1.2. Схема для расчета частиц

Это соотношение получено при следующих условиях. Площадка А испускает частицы массоотделения по диффузному закону $N_\theta = N_0 \cos\theta$. Потеря частиц массоотделения на пути от А до

dV за счет столкновений учитывается множителем $\exp(-r/l)$, l – длина свободного пробега частицы массоотделения. Рассеяние частиц из dV происходит изотропно ($\approx w'/4\pi$), причем потери на пути от dV до A' отсутствуют. Очевидно, что допущение об изотропности рассеяния завышает результат для площадок приемников, находящихся выше по течению (имеется в виду относительное расположение вектора скорости набегающего потока, рассеивающего объема dV и площадки приема A').

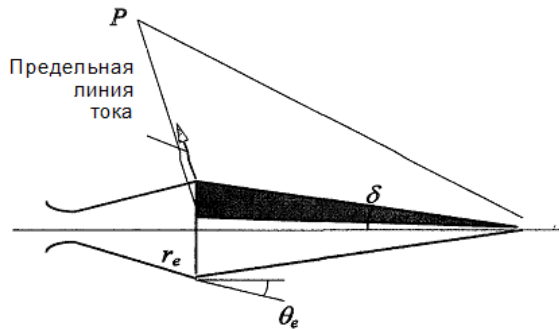


Рис. 1.3. Часть течения струи за выходом сопла

В работах [11, 18-24] предлагается определять потенциал загрязнения, рассматривая только область сплошнотечения (рис. 1.3).

При истечении струи из осесимметричного сопла в вакуум область течения сплошной среды за выходом сопла имеет форму конуса, полуугол при вершине которого равен:

$$\delta = \arctg \left[\frac{1}{2M_e \cos \theta_e} \left(\frac{2}{\gamma \pi} \right)^{1/2} \right], \quad (1.6.16)$$

где M_e и θ_e – число Маха на выходе сопла и полуугол раскрытия сопла, γ – отношение удельных теплоемкостей газа.

На рис. 1.3 показана часть течения, с которой происходит разлет молекул, попадающих в точку P , расположенную за предельными линиями тока в течении Прандтля-Майера (заштрихованная область). Эта часть поверхности однозначно оп-

ределяется расстоянием от точки Р в цилиндрической системе координат, связанной с осью сопла. Если точка Р расположена в тени, то есть за обечайкой сопла, то потоки массы и энергии равны нулю.

Полный поток массы, попадающий на элемент поверхности $d\sigma$, определяется выражением

$$dm = \frac{\rho_{AF}[\beta^2(UC)^2 + 1]Sd\sigma}{2\beta^4 e\beta^2(UC)^2}, \quad (1.6.17)$$

где ρ – плотность, А, F, С, β – постоянные, U – скорость, S – площадь эмиттирующей поверхности конуса.

Метод расчета использовался при проведении параметрических исследований влияния формы сопла, ориентации приемника на поверхности КЛА, параметров выхлопных газов на величину молекулярных потоков. Некоторые из полученных при этом качественных выводов подтвердились результатами экспериментальных исследований. Результаты расчетов показали, что для выхлопных газов при $\gamma \leq 1,25$ степень загрязнения почти не зависит от молекулярной массы выхлопных газов.

Продукты истечения струй могут попадать на элементы конструкций вследствие: прямого натекания на поверхность ЛА, переотражения потоков от соседних элементов, столкновений продуктов истечения между собой и частицами набегающего потока.

Для достаточно большой плотности на срезе сопла нерасчетной струи можно выделить три области течения: континуальную ($\lambda \gg 1$), переходную ($\lambda \sim 1$) и бесстолкновительную ($\lambda \ll 1$). В бесстолкновительной области скорость течения в струе приближается к максимальной термодинамической скорости:

$$V_{max} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} RT_0}, \quad (1.6.18)$$

где R – газовая постоянная. То – температура заторможенного потока, а линии тока соответствуют течению от сферического источника.

1.6.2 Методика расчета прямых потоков

Для расчета прямых потоков на элемент поверхности dS_j задача сводится к определению параметров поля течения струи. Величина этих потоков зависит от параметров на срезе сопла, состояния окружающей среды, а также геометрических соотношений системы источник-приемник (рис. 1.4).

В расчетной практике применяются приближенные методы расчета газодинамических параметров течения, основанные на тех или иных физических моделях течения в струе.

Наиболее распространена аппроксимационная зависимость для плотности в дальнем поле течения струи, полученная Робертсом из условий сохранения количества движения невязкого газа:

$$\frac{\rho}{\rho_E} = \frac{a}{2} \left(\frac{r}{r_E} \right)^{-2} (\cos\theta)^a, \quad (1.6.19)$$

где $a = \gamma(\gamma - 1)M_E^2$;

r – расстояние от точки в поле течения до центра среза сопла;

r_E – радиус среза сопла;

θ – полярный угол;

γ – отношение удельных теплоемкостей.

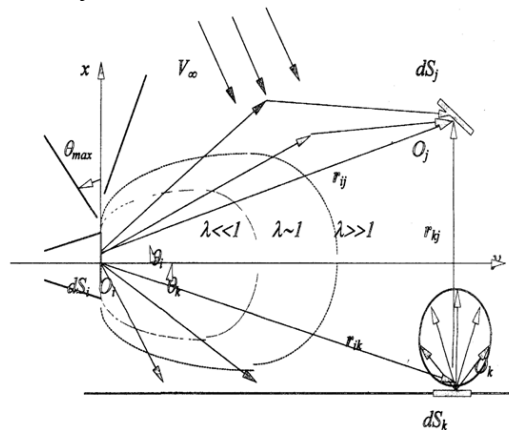


Рис. 1.4. Схема расчета прямых потоков на элемент поверхности dS_j

Индекс относится к параметрам на срезе сопла. Зачастую параметры на срезе сопла удобно характеризовать секундным расходом m .

Выразив в (1.6.19) концентрацию на срезе сопла через секундный расход, можно определить значение потока частиц струи на поверхность элемента dS_j :

$$dN_{ij} = nV_{max}dS_j = \frac{\dot{m}}{2\pi r_{ij}^2 \sin\theta} \int_0^{\theta_i} \cos^2 x dx dS_j. \quad (1.6.20)$$

Последнее выражение представляет собой значение потока dN_j при условии, что элемент dS_j не влияет на параметры потока и расположен в зоне прямой видимости из точки O_i . Это условие определяется неравенством $r_{ij}n_j < O_i$. Здесь n_j – внешняя нормаль к элементу dS_j . При наличии соседних элементов конструктивно-компоновочной схемы (ККС) тела необходимо учитывать возможность затенения элемента dS_j другими элементами конструкции. Площадка dS_j считается видимой, если отрезок прямой, соединяющий точку O_i с центром dS_j , не пересекает никакую поверхность. На практике это сводится к определению точек пересечения прямой, задаваемой радиусом-вектором r_{ij} , со всеми элементами ККС тела. Отличительной особенностью данного алгоритма является то, что параллельный поток заменен коническим с вершиной, лежащей в центре срезе сопла.

Для нахождения суммарных потоков, попадающих на отдельные элементы тел, необходимо выражение (1.6.20) проинтегрировать по поверхности этих элементов. При истечении струи в среду с постоянным давлением следует учитывать положение этих элементов относительно границы струи. При этом может оказаться, что часть поверхности находится за границей струи.

1.6.3 Методика учета переотражения прямых потоков в системах со сложной геометрией

В случае попадания частиц струи на соседний элемент dS_k его влияние на элемент dS_j можно оценить с помощью хорошо развитого математического аппарата для исследования процес-

сов молекулярного переноса между диффузно отражающими поверхностями. Для практического применения можно выделить два метода: метод Монте-Карло и метод угловых коэффициентов. Изложим МУК применительно к рассматриваемой задаче.

Предполагаем, что элемент поверхности dS_k отражает попавшие на него частицы диффузно с максвелловской функцией распределения по скоростям

$$f_k = \frac{\tilde{n}_k}{(2\pi RT_k)^{3/2}} \exp\left(-\frac{V^2}{2RT_k}\right) \quad (1.6.21)$$

при температуре его поверхности T_k . Тогда поток молекул с элемента dS_k и dS_j имеет значение

$$dN_{kj} = \tilde{n}_k \sqrt{\frac{RT_k}{2\pi}} dS_k d\varphi_{k-j} . \quad (1.6.22)$$

Концентрация частиц \tilde{n}_k с учетом (1.6.20) находится из условия непроницаемости поверхности:

$$\tilde{n}_k = \frac{\dot{m}}{\sqrt{2\pi RT_k} r_{ik}^2 \sin\theta_k} \int_0^{\theta_k} \cos^a x dx . \quad (1.6.23)$$

Величину $d\varphi_{kj}$ называют дифференциальным угловым коэффициентом излучения; он определяет долю потока, покидающего площадку dS_k в направлении площадки dS_j :

$$d\varphi_{k-j} = \frac{(-n_k^r \cdot n_j^r)}{\pi r_{kj}^2} dS_j , \quad (1.6.24)$$

где n_k и n_j – единичные векторы внешних нормалей к элементам dS_k и dS_j ;

r_{kj} – расстояние между этими элементами.

Условие взаимной видимости площадок определяется неравенством $n_k n_j > 0$. При наличии p однородно отражающих элементов поверхности соответствующие молекулярные потоки находятся из решения системы уравнений:

$$dN_j = \sum_{k=1}^n \varphi_{k-j} dN_{kj}, j = 1, \dots, n. \quad (1.6.25)$$

Для изучения процессов молекулярного переноса между поверхностями S_i и S_j вводится понятие интегрального углового коэффициента:

$$\varphi_{k-j} = \frac{1}{S_k} \int_{S_k} \int_{S_j} \frac{(-n_k n_j)}{\pi r_{kj}^2} dS_i dS_j. \quad (1.6.26)$$

Прямое статистическое моделирование процессов переноса включает в себя поочередно слежение за траекториями движения отдельных частиц с последующим осреднением приносимых ими молекулярных признаков.

1.6.4 Методика учета эффектов рассеяния частиц струи

Оценим влияние эффектов столкновения продуктов истечения с частицами набегающего потока и между собой.

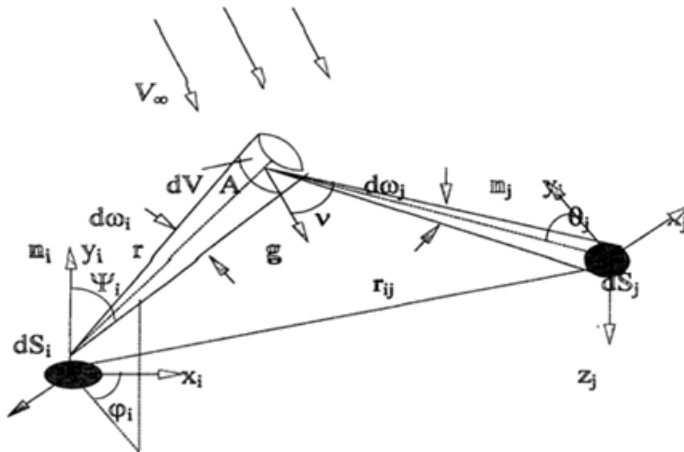


Рис. 1.5. Схема столкновений в точке A между молекулами набегающего потока

Запишем число столкновений в точке А (x_i, y_i, z_i) (рис. 1.5) между молекулами набегающего потока в единицу времени в элементе объема:

$$dN = n_{00} v_{21} dV, \quad (1.6.27)$$

где $v_{21} = n_A \sigma_{21} g_{12}$ – частота рассеяния частиц струи на частицах набегающего потока;

$\sigma_{21} = \pi/4(d_1 + d_2)^2$ – сечение рассеяния для молекул, моделируемых твердыми сферами диаметра d ;

$g_{12} = \left| \vec{V}_\infty - \vec{V}_{\max} \right|$ – относительная скорость сталкивающихся

частиц (индекс 1 относится к частицам набегающего потока, а 2 – к частицам струи);

$$dV = \rho^2 \sin\theta_i, d\theta_i, d\rho d\varphi_i.$$

Тогда число частиц, попадающих на элемент dS_j в результате столкновений, определяется как

$$dN_j = \frac{dN}{\pi} \cos v d\omega_j, \quad (1.6.28)$$

где v – угол между вектором относительной скорости сталкивающихся частиц g_{12} и вектором r_{Aj} , соединяющим точку А с элементом dS_j ; $d\omega_j$ – телесный угол, под которым виден элемент dS_j из точки А:

$$d\omega_j = \frac{dS_j \cos\theta_j}{r_{Aj}^2}. \quad (1.6.29)$$

Подставляя (1.6.29) в (1.6.28) с учетом (1.6.23), после несложных преобразований получаем общее число частиц, возвращающихся в единицу в результате столкновений на элемент dS_j :

$$N_j = \frac{\dot{m} d S_j}{2\pi \lambda_{21}} \int_0^\infty \int_0^{\pi/2} \int_0^\pi \frac{|\cos v| \cos\theta_j}{\pi r_{Aj}^2} \int_0^{\theta_i} \cos^a x dx d\rho d\theta d\varphi. \quad (1.6.30)$$

Здесь $\lambda_{21} = \frac{V_{\max}}{n_\infty \sigma_{21} g_{21}}$ – длина свободного пробега частиц струи в поле частиц набегающего потока.

Частицы из точки А попадают на элемент поверхности dS_j в том случае, если выполняется условие $\cos v \cos \theta_j = g_{12} n_j < 0$.

В силу сложности подынтегральной функции для тел пространственной конфигурации трудно провести оценки погрешности и выбрать шаг расчетной сетки для вычислений интеграла (1.6.30) по кубатурным формулам. В некоторых случаях выгоднее выполнить интегрирование с помощью статистических методов. Для этого приведем интеграл (1.6.30) к стандартному виду:

$$N_i = B \int_G f(P) p(P) dP, \quad (1.6.31)$$

где величина $B = \frac{1}{2\lambda_{21}} m dS_j$; $p(P) = f(\eta_i) f(\theta_i) f(\varphi_i)$ определена в G так, что $\int_G p(P) dP = 1$, а соответствующие плотности вероятности для переменных интегрирования имеют вид

$$f(\eta_i) = 1; f(\theta_i) = \frac{2}{\pi}; f(\varphi_i) = \frac{1}{2\pi}. \quad (1.6.32)$$

Оценкой интеграла служит величина

$$N_j = \frac{B}{k} \sum_{i=1}^k \frac{|\cos v| |\cos \theta_j|}{\eta_i r_{Aj}^2} \int_0^{\theta_i} \cos^a x dx, \quad (1.6.33)$$

где k – число испытаний, а переменные η_i , θ_i , φ_i определяются формулами:

$$\eta_i = \xi_i; \theta_i = 0,5\pi \xi_{i+1}; \varphi_i = 2\pi \xi_{i+2}. \quad (1.6.34)$$

Основным преимуществом метода статистических испытаний является то, что, проводя вычисления по формуле (1.6.33), одновременно со значением интеграла можно получить неплохую апостериорную оценку ошибки вычислений. Последний факт немаловажен в конструкторской практике, поскольку может быть указан доверительный интервал расчетных параметров.

Для расчета собственного рассеяния частиц струи число столкновений между частицами струи в точке А представим в виде

$$dN = \frac{1}{2} n_A v_{22} dV . \quad (1.6.35)$$

Предполагая столкновение частиц струи в точке А изотропным, их поток на элемент dS_j после столкновений определяется соотношением

$$dN_j = \frac{dN \cos \theta_j dS_j}{4\pi r_{Aj}^2} . \quad (1.6.36)$$

Частоту собственных столкновений частиц струи можно выразить в терминах поперечного сечения столкновений σ_{22} :

$$v_{22} \approx 0,806 \cdot \sigma_{22} V_{max} n_A . \quad (1.6.37)$$

Тогда после соответствующих преобразований выражение (1.6.36) примет вид

$$N_j = \frac{0,025 \sigma_{22} \dot{m} dS_j}{\pi^2 V_{max}} \int_0^1 \int_0^{\pi/2} \int_0^\pi \frac{\cos \theta_j}{(1-\eta_i) \pi \rho^2 r_{Aj}^2 \sin \theta_i} ; \cdot \left[\frac{a}{2} \int_0^{\theta_i} \cos^a x dx \right]^2 d\eta_i d\theta_i d\varphi_i . \quad (1.6.38)$$

Как и в случае рассеяния частиц струи на частицах набегающего потока, для вычисления интеграла (1.6.38) применима процедура метода Монте-Карло с учетом эффектов затенения при движении молекул в направлении ρ и r_{kj} .

2 ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

2.1 Параметры газовой выделения конструктивных материалов КА

2.1.1 Общие положения

Постановка вопроса о влиянии процессов газовой выделения конструктивных материалов космического аппарата (КА) на динамику развития СВА является новой в отечественной практике. Физическая сущность рассматриваемой проблемы заключается в следующем. На этапах создания и испытания КА находятся в термодинамическом равновесии с атмосферой Земли, что приводит к объемному и поверхностному насыщению (абсорбция и адсорбция) материалов разнообразными газовыми компонентами. (Более того, в результате проведения ряда высокотемпературных технологических операций система «твердое тело – газ» становится неравновесной, обладающей значительным периодом релаксации). Следующий этап – вывод КА на орбиту, является весьма кратковременным с точки зрения установления газового равновесия КА с новыми (вакуумными) условиями окружения.

Поэтому переход КА в равновесный режим происходит в период его функционирования и сопровождается интенсивным газовойделением материалов элементов конструкций, что и обуславливает вклад этой газовой компоненты в СВА.

Целью настоящего раздела является рассмотрение пространственно – временных характеристик процессов десорбции газовых компонент с поверхности КА, на основании учета ха-

рактических широкого круга общетехнических и ряда специальных материалов космической техники, и проведение количественных оценок вклада дегазации КА в процессы формирования СВА. Специфика и трудности проведения подобного рода оценочных расчетов ожидаемых параметров СВА обусловлены тем, что отечественная и зарубежная практика не располагает уверенными данными о вакуумных характеристиках материалов конструкций КА (для ряда интересующих материалов подобная информация и вовсе отсутствует). В этой связи практическая реализация поставленной задачи неизбежно связана с необходимостью привлечения ряда гипотез, не допускающих проведения строгих количественных оценок правомерности их использования. (В частности, для ряда конструкционных материалов в качестве исходных вакуумных характеристик приходится принимать характеристики ряда других исследованных материалов, близких по своему физико-химическому составу и структуре к исходным). Поэтому вопросы, связанные с определением погрешностей конечных результатов анализа, в данном разделе не рассматриваются.

Учитывая тот факт, что вопрос о нахождении параметров СВА ставится в связи с установлением повреждающего воздействия последней на элементы конструкций КА, общая формулировка настоящей проблемы должна предусматривать более широкую постановку, нежели определение вклада процессов десорбции газов из материалов КА. Расширенная постановка вопроса предусматривает также рассмотрение газовыделения конструкционных материалов в виде испарения и деструкции непосредственно самих материалов под воздействием термических и радиационных возмущающих факторов КП. Однако исследования подобного рода весьма малочисленны, имеют разрозненный характер и, в этой связи, не могут являться основой для систематизации параметров СВА построения моделей повреждающего воздействия упомянутых газовых компонент СВА на элементы конструкций КА [64-90].

2.1.2 Кинетика процессов газовыделения конструкционных материалов КА

Десорбция газов из конструкционных материалов в условиях вакуумного окружения является монотонно убывающей функцией времени. Кинетическая зависимость скорости газовой выделенной в условиях, характерных для режимов эксплуатации КА, может быть условно разделена на три характерных этапа: начальный, переходный, квазистационарный.

Начальный этап удовлетворительно аппроксимируется линейной зависимостью вида

$$q = q_n * [1 - (1 - (q_0 / q_n)) * (t / t_0)] , \quad (2.1.1)$$

где q – текущее удельное газовыделение;

q_n – начальное удельное газовыделение;

q_0 – начальное удельное газовыделение переходного этапа;

t и t_0 – соответственно текущее и начальное для переходного этапа время.

При эксплуатации КА начальный этап кинетической зависимости газовой выделенной соответствует этапу вывода КА на орбиту. Выражение (2.1.1) получено в результате лабораторных исследований вакуумных характеристик конструкционных материалов, прошедших ряд типовых технологических операций по поверхностной очистке. Только в этом случае величинам q_0 , и в особенности q_n , можно предать определенное значение.

Для рассматриваемого случая, даже если на этапе изготовления и сборки элементов конструкции, последние в той или иной форме были подвергнуты специальным технологическим операциям очистки, значение величины q_n будет неопределенным, поскольку будет определяться условиями транспортировки и хранения КА (за исключением тех случаев, когда элемент конструкции предварительно вакуумируется в земных условиях).

В этой связи практическая значимость выражения (2.1.1) становится незначительной.

На переходном этапе скорость газовой выделенной удовлетворительно аппроксимируется степенной

– А

$$q = q_0 t, \quad (2.1.2)$$

либо экспоненциальной

$$q = q_0 \cdot \exp \{ -(t / \theta) \} \quad (2.1.3)$$

зависимостями, где параметры q_0 , α , θ являются индивидуальными вакуумными характеристиками конструкционных материалов. В ряде справочников по вакуумным характеристикам материалов приводятся данные для видоизмененного выражения (2.1.3) в эквивалентном виде :

$$\lg q = A - B \cdot t, \quad (2.1.4)$$

где в качестве вакуумных характеристик фигурируют величины (А и В) . В условиях эксплуатации, характерных для КА рассматриваемого типа, длительность переходного режима оценивается в зависимости от типа конструкционного материала временными интервалами (данные ориентировочные):

- металлы: 10 – 100 ч;
- неметаллы (неорганические): 50 – 500 ч;
- неметаллы (органические): 100 – 5000 ч.

Параметры скорости газовой выделенной на переходном этапе для вышеперечисленных типов материалов и ряда материалов специального назначения приведены в табл. 2.1–2.4.

Конечный этап газовой выделенной конструкционных материалов (квазистационарный), при котором уровень газовой выделенной является практически постоянным, характерен для поздних этапов функционирования КА на орбитах. Систематизированные данные для квазистационарного режима газовой выделенной отсутствуют. Некоторое представление о параметрах газовой выделенной в квазистационарном режиме можно составить исходя из рассмотрения результатов по газовой выделенной материалов, прошедших длительную высокотемпературную вакуумную тренировку, приведенных в табл. 2.5.

Органический характер сведений о вакуумных характеристиках конструктивных материалов (в особенности это касается материалов специального назначения, используемых в практике создания КА) создает известные трудности при оценке вклада газовой выделенности материалов и элементов конструкций КА в СВА. Положение усугубляется и тем обстоятельством, что приводимые в настоящем разделе вакуумные характеристики материалов получены в лабораторных условиях, неадекватных реальным условиям эксплуатации КА.

Таблица 2.1. **Параметры десорбции металлических конструкционных материалов**

Наименование материала	Вид предварительной обработки	$\underline{Lg} q = A - Bt$		$q_0 \cdot 10^8$ л.гопп $c^{-1}cm^{-2}$	α
		$q(m^3)Па/$ $/m^2c, A$	$t-c$ B		
Сталь (малоуглеродн.)	НУ	-3,142	$4,16 \cdot 10^{-5}$	-	-
	Б	-	-	0,1-0,8	1,2
Сталь (нержавеющая)	Н	-2,840	$7,33 \cdot 10^{-5}$	0,3-0,8	0,7
	Б,С	-	-	0,05-0,1	0,7
Алюминий	Н	-	-	0,5-0,1	1,2
	Бз,А	-	-	0,1	1,2
Дюралюминий	Н	-3,135	$3,25 \cdot 10^{-5}$	3,0-5,0	0,8
	Бз,А	-3,476	$2,08 \cdot 10^{-5}$	-	-
	Т,Бз,А	-4,05	$7,55 \cdot 10^{-5}$	0,2-0,5	0,8
Медь	Н	-3,592	$3,36 \cdot 10^{-5}$	3,0-5,0	1,0
	Т,Бз,А	-4,686	$7,73 \cdot 10^{-5}$	0,06-0,1	1,0
Титан	Н	-	-	0,1-0,3	0,7
	Т,Б,С	-	-	0,05-0,1	0,7
Латунь	Н	-3,36	$3,08 \cdot 10^{-5}$	-	-
	Т,Бз,А	-4,436	$7,69 \cdot 10^{-5}$	-	-
Сварной шов на меди	НУ	-1,406	$4,08 \cdot 10^{-5}$	-	-

Примечание. При указании типа обработки поверхности материала использованы обозначения: НУ – не указана; Н – не обработана; Т – химическое (электрохимическое) травление; Б – промывка в бензине; Бз – промывка в бензоле; А – промывка в ацетоне; С – промывка в спирте.

В то же время следует ожидать, что влияние ряда факторов КП (например, радиационных) и эффектов взаимодействия поверхности КА с набегающим потоком атмосферы КП может значительно изменить характеристики и механизмы дегазации с поверхности КА.

Таблица 2.2. Параметры десорбции неметаллических конструкционных материалов

Наименование материала	Вид предварительной обработки	$q_0 \cdot 10^8$ л.торр $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$	α
Стеатит	Б, С	0,8-1,0	0,6
Форстерит	Б, С	1,0	—
Алюмооксид	Б, С	0,8-3,0	0,3-0,5
Муллит	Н	6,0-20,0	—
Ферриты	Н	0,3-10,0	—
Стекло (вакуум)	С	0,02-1,0	0,7
Кварц	С	0,05-1,0	—
Ситалл	С	0,2-0,5	0,4
Каучук (натур.)	Н	0,6	—
Резина (вакуум.)	Н	10-50	—
Витон	Н	2-5	—
Оргстекло	Н	5,0-20,0	—
Фторопласт-4	Н	0,2-1,0	—
Полиэтилен	Н	10-50	—
Полиамид	Н	2,0-6,0	—
Эпоксидная смола	Н	0,5-1%	—
Нейлон	Н	$(5-10) \cdot 10^2$	—
Графит	Н	$10^2 - 10^4$	—
Клей:			—
поливинилбутил	Н	9	—
поливинилацетат	Н	0,3-1,0	—
БФ – 4	Н	10	—

Примечание. Условные обозначения обработки поверхности приведены в примечании табл. 2.1.

**Таблица 2.3. Параметры десорбции
конструкционных материалов специального назначения**

Наименование материала	Режим испытания		Газовыделение и деструкция А-л.торр.с ⁻¹ см ⁻² , В-г. с ⁻¹ см ⁻²
	Температура, °С	Продолжит., час.	
ЭФ – 32 – 301			
(МРТУ6-11-140-70)	150	70	2*10 ⁻⁷ (А)
АГ-4В, АГ-4С	50	50	2,4*10 ⁻⁶ (А)
(ГОСТ 20437-75)	230	5	6*10 ⁻⁸ (В)
ДСВ	20	30	3*10 ⁻⁹ (В)
(МРТУ 6-11-74-67)	125	30	1*10 ⁻³ (В)
	160	30	1,5*10 ⁻⁹ (В)
Тефлон	20	-	1*10 ⁻¹⁰ (В)
(МРТУ-05-926-64)	100	-	2*10 ⁻¹⁰ (В)
Полиуретан	20	430	2*10 ⁻¹⁰ (В)
(ПУ-101)	140	130	2*10 ⁻⁹ (В)
	210	60	1*10 ⁻⁸ (В)
Полиуретан	20	15	5*10 ⁻⁵ л.торр.г ⁻¹ .с ⁻¹ (В)
(ППУ-305А)	130	50	3*10 ⁻⁹ (В)
Углепластик	50	0,5	1*10 ⁻¹¹ (В)
(УЛ-3)	100	0,65	1*10 ⁻¹¹ (В)
Покрытие	50	0,5	9,5*10 ⁻¹⁰ (В)
(ОСО)			
ЭВТИ – 2В-30			
(ОСТ 92-0918-70)	100	0,5	9,5*10 ⁻¹⁰ (А)

Таблица 2.4. Параметры десорбции покрытий

Наименование материала	$q_0 \cdot 10^8$ л.торр $\text{с}^{-1}\text{см}^{-2}$	α	Десорбция водорода, %	Потеря масс после 10^4 час, $\text{г}\cdot\text{см}^{-2}$
КО-818 (эмаль)	0,4	0,5	30	$2 \cdot 10^{-4}$
КО-1819 (эмаль)	0,7	0,8	20	$5 \cdot 10^{-4}$
ЭП-140 (эмаль)	0,8	1,0	55	$2 \cdot 10^{-5}$
К-55 (лак)	0,2	0,5	43	$6 \cdot 10^{-6}$
КО 2 – 08 (лак)	0,2	0,5	32	$6 \cdot 10^{-6}$
Л24-7 (5) (лак)	0,2	0,5	47	$1,6 \cdot 10^{-4}$
КО-818 (эмаль)	0,4	0,5	30	$2 \cdot 10^{-4}$
КО-1819 (эмаль)	0,7	0,8	20	$5 \cdot 10^{-4}$
ЭП-140 (эмаль)	0,8	1,0	55	$2 \cdot 10^{-5}$
К-55 (лак)	0,2	0,5	43	$6 \cdot 10^{-6}$
КО 2 – 08 (лак)	0,2	0,5	32	$6 \cdot 10^{-6}$
Хром (гальван.)	1,1	-	66	$3 \cdot 10^{-6}$
Никель (гальван.)	4,0	-	41	$3 \cdot 10^{-6}$

Таблица 2.5. Скорость газовыделения конструкционных материалов в квазистационарном режиме

Наименование материала	Режим испытания		Газовыделение $\text{А}\cdot\text{м}^3\cdot\text{Па}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ $\text{В}\cdot\text{л}\cdot\text{торр}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$
	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Продолжит., час.	
Сталь (нерж.)	20 400	8	$3,09 \cdot 10^{-8}$ (В) $4,1 \cdot 10^{-6}$ (А)
	400	1	$(1-4) \cdot 10^{-8}$ (А) $(0,3-9) \cdot 10^{-12}$ (В)
Медь	20	8	$4,43 \cdot 10^{-7}$ (А) $3,34 \cdot 10^{-10}$ (В)
	400	1	$(0,1-9) \cdot 10^{-9}$ (А) $(0,08-7) \cdot 10^{-12}$ (В)
Фторопласт	20	20	$1 \cdot 10^{-4}$ (А) $1 \cdot 10^{-7}$ (В)
Стеатит	20	20	$6 \cdot 10^{-5}$ (А) $5,6 \cdot 10^{-8}$ (В)
Резина (14Р-23)	200	25	$7 \cdot 10^{-5}$ (А) $5 \cdot 10^{-8}$ (В)
	20	После охлажд.	$2,5 \cdot 10^{-5}$ (А) $2 \cdot 10^{-8}$ (В)

Нейлон	20	20	$5 \cdot 10^{-3}$ (А) $4 \cdot 10^{-6}$ (В)
Оргстекло	20	20	$1 \cdot 10^{-3}$ (А) $0,2 \cdot 10^{-6}$ (В)

2.1.3 Радиационные аспекты дегазации и деструкции конструкционных материалов КА

Учитывая специфику условий эксплуатации КА, следует принять во внимание возможность повышения уровня газовыделения конструкционных материалов КА в результате проявления эффектов радиационной десорбции и деструкции полимеров.

Прямые исследования радиационной дегазации в реальных условиях эксплуатации КА не проводились. В этой связи приводимые в табл. 2.6 результаты исследования радиационной дегазации, полученные при облучении материалов электронами с энергией 50 кэВ и 3 МэВ, должны рассматриваться в качестве предварительных. В частности, в первом приближении можно заключить, что радиационная десорбция и деструкция практически не зависят от поглощенной дозы, пока материал сохраняет свои основные физико-механические параметры. Показано также, что основной вклад в состав продуктов десорбции для всех исследованных материалов (кроме фторопласта – 4) дает водород (от 60 до 90 %).

2.1.4 Парциальный состав продуктов дегазации конструкционных материалов КА

Исследование парциального состава дегазации (деструкции) приобретает исключительный интерес в свете построения физико-химических моделей повреждающего воздействия СВА на элементы конструкций КА. Рассмотрение широкого спектра

разнообразных фото-химических процессов, имеющих место как в газовой среде СВА, так и непосредственно на элементах поверхности КА, где в качестве исходных реагентов выступают газообразные продукты вторичной сорбции газовых компонент СВА, предполагает наличие полных данных о качественном составе СВА. Следует, однако, заметить, что если процессы дегазации материалов исследованы недостаточно (см. раздел 2.1.2) для сформулированных целей работы, то параметры парциального состава продуктов дегазации, в особенности для материалов специального назначения, в реальных условиях эксплуатации КА отсутствуют как таковые.

Таблица 2.6. Радиационная десорбция и деструкция полимерных материалов в вакууме при облучении электронами

Наименование материалов	Радиационное газовыделение и деструкция	
	молекул /100 эВ	10^{-21} [л.гопп/100эВ]
Полиимиды (П)	$8 \cdot 10^{-3}$	0,2
Фторопласт – 4	$0,8 \cdot 10^{-2}$	0,24
Стеклопластики	$2 \cdot 10^{-2}$	0,6
Эпоксидные компаунды	$4 \cdot 10^{-2}$	1,2
Полистирол (П)	$4 \cdot 10^{-2}$	1,2
Оргстекло	$6 \cdot 10^{-2}$	1,8
Лавсан (П)	$8 \cdot 10^{-2}$	2,4
Полиэтилен	0,4-2	12 – 60
Триацетат целлюлоза (П)	$8 \cdot 10^{-2}$	24

Примечание. Символ (П) соответствует пленочному исполнению конструкционного материала.

В этой связи в первом приближении приходится довольствоваться результатами лабораторных исследований материалов электровакуумного назначения относительно материалов и ряда неорганических диэлектриков и весьма ограниченным объемом

сведений о качественных характеристиках материалов специального назначения, приведенных в табл. 2.1 и 2.2 (ряд данных в табл.2.1, имеют противоречивый характер: с ростом температуры суммарное количество газа уменьшается). Это может иметь место при ступенчатом режиме повышения температуры. В этой связи к ряду данных табл.2.7 следует относиться с известной осторожностью. Подобное замечание можно отнести и к ряду данных табл.2.8. Реальные условия эксплуатации могут внести значительные коррективы в приведенные результаты лабораторного исследования парциального состава. В частности, вследствие эффектов фотоионизации значительные отклонения следует ожидать для низкомолекулярных компонент, не говоря уже о продуктах деструкции органических материалов. В табл.2.9 приведены примеры ряда элементарных фотохимических процессов, определяющих равновесное состояние газовых компонент на рассматриваемых высотах функционирования КА. Ряд данных относительно радиационной деструкции полимеров приведены в разделе 2.1.3. В последнем случае, исходя из общих физико-химических представлений о радиационных процессах в твердых телах, следует ожидать появление не только низкомолекулярных, но и высокомолекулярных продуктов в виде мономеров, олигомеров и радикальных групп. С точки зрения повреждающего воздействия СВА на конструкционные материалы КА едва ли не самым негативным является наличие продуктов дегазации в возбужденной, ионизированной и радикальной формах (см.табл.2.9).

Таблица 2.7. Парциальный состав продуктов дегазации металлических конструкционных материалов

Наименование материала	Температура, °С	Суммарное количество газа	Водород 10^{-2}	Азот 10^{-2}	Оксид углерода 10^{-2}
Сталь (углеродистая)	700	0,15	2,05	7,45	5,86
	1000	0,22	3,70	3,65	14,2
Сталь (нержавеющая)	600	0,24	21,6	0,38	1,54
	800	0,09	5,5	0,39	2,67
	1000	0,449	0,18	0,51	26,3

Медь	400	$4,22 \cdot 10^{-2}$	2,33	0,10	1,89
Никель	400	0,21	10,7	8,59	9,66
	800	$5,37 \cdot 10^{-2}$	0,32	0,32	4,73
	1000	0,15	5,16	0,53	9,05
Молибден	500	$5,41 \cdot 10^{-2}$	3,42	0,16	1,86
	700	$4,91 \cdot 10^{-2}$	1,14	0,85	2,92
	1000	$8,2 \cdot 10^{-2}$	1,84	0,67	5,69
Ковар	600	$9,67 \cdot 10^{-2}$	2,08	0,29	7,3
	800	0,24	3,33	0,39	20
	1000	2,81	48,9	63,5	168

Примечания. Результаты получены в лабораторных условиях, единица измерения: $\text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Таблица 2.8. Парциальный состав продуктов дегазации и десорбции неорганических диэлектриков и материалов специального назначения

Наименование материала	Температура, °С	Состав газов %						
		H ₂	CH ₄	H ₂ O	N ₂	O ₂	CO ₂	Прочие
Ферриты	20	1-4	2-3	80-98	1-4	5-9	1-2	1-2
Форстерит	20	39	-	9	40	-	5	-
	800	70	1	-	7	-	22	-
Стеатит	20	93	-	3	2	-	2	-
	800	96	-	-	4	-	-	-
Ситалл	20	75	-	7-87	7	-	15	-
Клеи	20	-	-	+	5	-	2	-
ЭФ-32-301	150	+	1	+	+	+	-	ф
	250	+	+	+	+	-	-	ф,оэ,о
АГ-4В	50	+	+	+	+	+	+	Ф
АГ-4С	230	+	+	+	+	+	+	ф,оэ,о
ПУ-101	20	-	-	+	-	-	+	-
	200	-	+	+	-	-	-	К, В
УП-3	100	-	-	+	-	-	+	-

ТТП-ФС	130	-	-	+	-	-	+	-
ОСО	50	-	-	+	-	-	+	-
ЭВТИ-2В-30	100	-	-	+	-	-	+	о,и,тк,т э

Примечания. Результаты получены в лабораторных условиях; Исползованы обозначения: + – компонент присутствует, но количественные данные отсутствуют; Ф – фенол, ОЭ – окись этилена, К – следы катализатора, В – следы вспенивания, О – олигомеры, С₈ – С₁₀, И – изопропиловый спирт, ТК – тетрафталиевая кислота, ТЭ – тетрафталиевый эфир.

Таблица 2.9. Химические процессы и константы скорости, обусловленные фотоэлектронным возбуждением солнечного излучения на высотах более 300 км

Химическая реакция	Константа скорости
$N_2^+ + e \rightarrow N + N$	$3,0 \cdot 10^{-7} (T/300)^{-0,02}$
$N_2^+ + O \rightarrow NO^+ + N$	$1,4 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (при 300 К)
$N_2^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + N_2$	$1 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (при 300 К)
$O^+ + N_2 \rightarrow NO^+ + N$	$1,2 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (при 300 К)
$NO^+ + e \rightarrow N + O$	$4,5 \cdot 10^7 (T/300)^{-1}$
$N^+ + O_2 \rightarrow NO^+ + O$	$3,5 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (при 300 К)
$O_2^+ + N \rightarrow NO^+ + O$	$1,8 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (при 300 К)
$O^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + O$	$2 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (при 300 К)
$O^+ + e \rightarrow O + h\nu$	$4 \cdot 10^{-12} (T/300)^{-0,7}$
$NO^+ + e \rightarrow N + O$	$4,5 \cdot 10^{-7} (T/300)^{-1} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
$O_2^+ + e \rightarrow O + O$	$2 \cdot 10^{-7} (T/300)^{-0,7} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
$N_2^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + N_2$	$3 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
$He^+ + N_2 \rightarrow He + N + N^+$	
$N + h\nu \rightarrow N^+ + e$	$1 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
$N_2 + h\nu \rightarrow N + N^+ + e$	Отсутствуют
$He^+ + O_2 \rightarrow He + O + O^+$	
$He^+ + N_2 \rightarrow N^+ + N + He$	$1 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ (при 300 К)
$\rightarrow N_2^+ + He$	$1,4 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$

2.1.5 Суммарное объемное газосодержание конструкционных материалов КА

Ввиду ограниченности объема информации о газовыделении конструкционных материалов КА, уместным дополнением является рассмотрение вопроса о газосодержании материалов.

Параметры газосодержания характеризуют предельные количества газовых компонент, определяющих вклад в СВА процессов дегазации материалов. В первом приближении зависимость растворимости газов в твердом теле от давления газа и температуры тела описывается эмпирическим выражением:

$$S = S_0 p^{1/n} \exp(W_s/nkT), \quad (2.1.5)$$

где S – растворимость газа; S_0 – константа растворимости; p – давление газа (в данном случае 760 мм рт.ст., если материал не подвергался дополнительной обработке с повышением давления); n – степенной фактор, равный 1 для неметаллов и 2 для металлов; W_s – энергия активации растворимости газа в твердом теле; k – постоянная Больцмана.

Параметры растворимости некоторых газов в металлических материалах приведены в табл. 2.10 (Приведенные данные относятся к материалам электровакуумной промышленности, прошедшим предварительный типовой технологический процесс очистки поверхности).

Интересно сопоставить данные табл. 2.10, 2.6, 2.11 и на основании подобного сопоставления оценить продолжительность процессов газовыделения. Количественные оценки удобно провести на примере меди (для этого материала имеются наиболее полные исходные данные), согласно нижеприведенной последовательности действий:

- прием объем образца меди равным $V = 10^{-6} \text{ м}^3$ (в форме куба);
- суммарный объем газосодержания составит:

$S_r = SVp = 8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-3} \text{ Па} = 6 \cdot 10^{-1} \text{ л} \cdot \text{торр}$, где S – растворимость – $8,6 \text{ м} \cdot \text{Па} \cdot \text{кг}$; p – плотность меди $8,93 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

- для квазистационарного режима имеем выражение:

$$S_r = tqS,$$

где q – скорость газовой выделению, равная $3,3 \cdot 10^{-10}$ л·торр·см·см⁻²·с⁻¹ (табл.1.5); S – площадь образца, равная $6 \cdot 10^{-2}$ м².

Таблица 2.10. Характеристики растворимости некоторых газов в металлических материалах в нормальных внешних условиях (Т=300К, Р=760 мм рт.ст.)

Наименование материала	Газ	Температура испытания, °К	S , м ³ ·Па·кг ⁻¹	S_0 , м ³ ·Па·кг ⁻¹	W_s , Дж.кмоль ⁻¹
Железо	H ₂	1373	7,0	2,29	$5,05 \cdot 10^7$
	O ₂	1273	28,0	2,31	$1,74 \cdot 10^7$
	N ₂	1343	19,0	-	-
Никель	H ₂	673	3,15	1,0	$2,47 \cdot 10^7$
Сталь (нерж.)	H ₂	673	-	0,66	$1,97 \cdot 10^7$
Медь	H ₂	1273	1,58	2,09	$7,77 \cdot 10^7$
	O ₂	1223	7,0	1,57	$3,35 \cdot 10^7$
Серебро	H ₂	873	0,17	0,19	$4,98 \cdot 10^7$
	O ₂	873	1,26	-	-
	N ₂	1073	3,37	-	-
Молибден	H ₂	1441	0,62	0,32	$5,94 \cdot 10^7$
	N ₂	1368	13,0	22,2	$1,61 \cdot 10^8$
Вольфрам	N ₂	2273	0,08	12,6	$3,12 \cdot 10^8$
Платина	H ₂	1616	0,93	6,95	$1,44 \cdot 10^8$
Палладий	H ₂	1273	0,78	1,74	$4,81 \cdot 10^6$

Отсюда находим время дегазации квазистационарного режима:

$$t = S_r / (qS) \approx 3 \cdot 10^8 \text{ с } (\sim 10^5 \text{ ч}).$$

Для переходного режима имеем выражение

$$S_r = S \int_0^t q_0 t^{-\alpha} dt,$$

где q_0 и α – параметры газовой выделенности в переходном режиме, равные (табл. 2.1): $q_0 = 4$ (неочищенные образцы); $q_0 = 0,1$ (очищенные образцы); $\alpha = 1,0$.

После интегрирования имеем:

$$t = [(2S_r)/(Sq_0)]^{1/2} = \begin{cases} 7 * 10^3 \text{ с } (\sim 2 \text{ ч.}) \\ 4 * 10^4 \text{ с } (\sim 12 \text{ ч.}) \end{cases}$$

Таким образом, можно заключить, что процесс активной дегазации для очищенных металлов имеет длительность несколько часов, а неочищенных – несколько десятков часов. Полная же продолжительность процесса дегазации составляет по порядку величины 10 ч (10 лет) в режиме квазистационарной дегазации. Для неметаллических конструкционных материалов эти показатели должны быть увеличены на 1-2 порядка.

2.2 Методы оценки обобщенных параметров СВА, обусловленной газовой выделенностью материалов конструкций КА

2.2.1 Постановка вопроса

Оценка вклада процессов дегазации материалов конструкций КА в СВА проводится на основании данных, приведенных в разделе 2.1. В конкретной постановке, отражающей реальные потребности практики, рассмотрению подлежат методики определения:

- суммарного количества продуктов газовой выделенности, вносящих вклад в СВА КА;
- пространственно-временных характеристик концентрации газовых молекул продуктов дегазации поверхности КА в окрестности КА.

Здесь следует привести ряд значительных замечаний относительно правомерности использования материалов в разделе 2.1 для решения указанных вопросов. В первом случае рассмотрение проводится исключительно в рамках представления раз-

дела 2.1 и поэтому вопроса о правомерности и не возникает. Во втором случае подобная однозначность не имеет места, поскольку сам по себе вопрос о переводе представлений, составляющих основу раздела 2.1, в рамки концентрационных представлений требует привлечения ряда неочевидных гипотез. Наибольшее затруднение вызывает тот факт, что экспериментальные данные, приводимые в разделе 2.1, получены в квазистационарном режиме, в том числе при работе откачных средств. Отсюда следует, что лабораторные газовые среды являлись неравновесными, и в этой связи использование основных законов газового состояния становится проблематичным. В этом смысле более достоверными являются результаты масс спектрометрических исследований, непосредственно характеризующие концентрацию газовых молекул. Однако подобные данные с коррекцией результатов эталонными средами в настоящее время отсутствуют для рассматриваемого круга материалов и условий газовыделения (необходимым условием является адиабатический режим дегазации без ограничений, обусловленных возможностями откачных средств).

2.2.2 Суммарная скорость и объем газовыделения конструкционных материалов КА

Скорость газовыделения единичного источника Q^i гс дегазации определяется на основании очевидного выражения

$$Q^i_{гс} = S^i q^i(t), \quad (2.2.1)$$

где S^i – площадь поверхности источника $i^{гс}$ типа;

$q^i(t)$ – удельная скорость газовыделения материала источника $i^{гс}$ типа.

Суммарный объем продуктов газовыделения от единичного источника $i^{гс}$ типа определяется выражением

$$Q^i_{г} = S^i \int_0^{\tau} q^i(t) dt, \quad (2.2.2)$$

где τ – продолжительность функционирования КА.

Суммарная скорость газовой выделения КА в целом определяется путем суммирования скорости газовой выделения всех индивидуальных источников:

$$Q_{\text{ср}}^i = \sum S^i q^i(t) . \quad (2.2.3)$$

Аналогичным образом, суммарный объем газовой выделения КА в целом определяется суммированием индивидуальных вкладов (см. выражение 2.2.2) единичных источников :

$$Q_{\Gamma}^i = \sum S^i \int_0^{\tau} q^i(t) dt . \quad (2.2.4)$$

При использовании зависимостей скорости газовой выделения выражения (2.2.3) и (2.2.4) приобретают вид:

$$Q_{\text{ср}}^i = \sum S^i q_0^i t^{-\alpha'} ; \quad (2.2.5)$$

$$Q_{\text{ср}}^i = \sum S^i 10^{A'-B't} ; \quad (2.2.6)$$

$$Q_{\Gamma}^i = \sum S^i q_0^i \int_0^{\tau} t^{-\alpha'} dt ; \quad (2.2.7)$$

$$Q_{\Gamma}^i = \sum S^i 10^{A'} \int_0^{\tau} 10^{-B't} dt , \quad (2.2.8)$$

где индексы q_0^i , α^i , A^i , B^i являются параметрами газовой выделения индивидуальных источников. Выражения, характеризуемые индексами А и В (например: 2.2.5 и 2.2.6), являются эквивалентными с практической точки зрения. Однако выражения с индексами В заслуживают большего доверия ввиду большей достоверности результатов экспериментальной апробации параметров А и В . В этой связи эти выражения взяты за основу в дальнейшем рассмотрении.

После взятия интеграла (выражение 2.2.8) для суммарного объема газовой выделения имеем:

$$Q_{\Gamma}^i = \sum [(S^i 10^{A'}) / (2,3 B^i)] (1 - 10^{B'\tau}) . \quad (2.2.9)$$

Очевидно, что при $\tau \rightarrow \infty$ Q_{Γ}^c величина стремится к своему предельному значению Q_{Γ}^c (пред), поскольку параметры B^i и τ являются существенно положительными величинами:

$$Q^i_{г}(\text{пред}) = \sum [(S^i 10^{-A'}) / (2,3 V^i)] . \quad (2.2.10)$$

Пример оценочного расчета параметров Q_g и $Q_{ст}$

В табл. 2.11 и 2.12 представлены результаты оценочного расчета суммарного объема и скорости газовыделения продуктов дегазации конструкционных материалов КА (исходные параметры конструкционных материалов и геометрические характеристики элементов конструкций КА приведены в табл. 2.11). На основании представленных результатов можно сформулировать ряд практических выводов относительно параметров газовыделения рассмотренного КА:

- максимальная скорость газовыделения в начальный момент функционирования КА $= 2,2 \cdot 10^{-1} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$;
- после 100 часов функционирования КА единственным источником газовыделения является материал ТЗП, имеющий суммарную скорость газовыделения менее $3,9 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$, все остальные материалы находятся в квазистационарном режиме газовыделения со скоростью газовыделения менее $6,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$;
- суммарный объем газовыделения практически достигает своего предельного значения $4,2 \cdot 10^4 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}$ после 500 часов функционирования КА;
- более 50% суммарного объема газовыделения приходится на первые 100 часов функционирования КА. Приведенный оценочный расчет следует рассматривать в качестве первого приближения, приводящего к заниженным результатам по скоростям и объему газовыделения. Причиной этого является то, что при проведении расчетов:
- учитывались параметры А и В, характерные для низкомолекулярных продуктов газовыделения (Аналогичные данные по высокомолекулярной составляющей продуктов дегазации отсутствуют);

- не учитывалось активирующее влияние радиационных факторов КП на процессы дегазации (эти данные в настоящее время также отсутствуют).

Тем не менее на основании полученных данных можно составить общее представление о вкладе процессов газовыделения конструкционных материалов КА в СВА.

Таблица 2.11. Результаты оценочного расчета суммарного объема газовыделения конструкционных материалов КА конкретного типа при различных продолжительностях функционирования КА

Наименование материала (элементов конструкции)	A^i $\text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	B^i с^{-1}	S^i м^{-2}	Q^i_{Γ} $\text{м}^3 \cdot \text{Па}$	$Q^i_{\Gamma} ; \text{м}^3 \cdot \text{Па}$				
					1 ч	10 ч	10^2 ч	$5 \cdot 10^2$ ч	10^3 ч
Металлы	-3	$3 \cdot 10^{-5}$	100	$1,4 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^2$	$1,26 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^3$
ТЗП	-2	10^{-6}	9	$3,9 \cdot 10^4$	$3,9 \cdot 10^2$	$3,1 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^4$	$3,8 \cdot 10^4$	$3,9 \cdot 10^4$
ЭВТИ	-4,5	$10^{-4,5}$	45	19,6	4,3	18,2	19,6	19,6	19,6
Панели СБ	-3	10^{-5}	27	$1,2 \cdot 10^3$	96	$6,7 \cdot 10^2$	$1,2 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^3$
Итого (Q_{Γ})	–	–	–	$4,2 \cdot 10^4$	770	$5,1 \cdot 10^3$	$2,4 \cdot 10^4$	$4,1 \cdot 10^4$	$4,1 \cdot 10^4$

Примечания:

1. Значения параметров A^i и B^i выбирались по критерию подобия реальных материалов (по физико-химическим характеристикам) табличным аналогам;

2. Для представления результатов расчета в единицах (л.торр) их необходимо умножить на 7,5.

3. Параметр Q^i_{Γ} (пред) характеризует максимальный объем газовыделения представленных групп материалов (элементов конструкций).

Таблица 2.12. Результаты оценочного расчета суммарной скорости газовыделения продуктов дегазации конструкционных материалов КА конкретного типа в различные моменты времени функционирования КА

Наименование материала (элемента) конструкции	$Q_{сг}^i, \text{М}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$					
	0 ч	1 ч	10 ч	10^2 ч	$5 \cdot 10^2$ ч	10^3 ч
Металлы	10^{-1}	$7,8 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-12}$	кс	кс
ТЗП	$9,0 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$
ЭВТИ	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	кс	кс	кс
Панели СБ	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$6,8 \cdot 10^{-6}$	кс	кс
Итого ($Q_{сг}$)	$2,2 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$

Примечания: 1. Геометрические параметры материалов (элементов) приведены в табл. 2.11.

2. кс – эти значения и далее соответствуют квазистационарному режиму газовыделения.

3. Для представления результатов расчета в единицах ($\text{л} \cdot \text{торр} \cdot \text{с}^{-1}$) их необходимо умножить на 7,5.

2.2.3 Суммарная масса и массовая скорость дегазации конструкционных материалов КА

Вопрос об определении массовых эквивалентов полученных выше иных характеристик газовыделения неоднозначен в своей постановке. Здесь имеются трудности двоякого рода.

Первая трудность обусловлена отсутствием данных о парциальном составе продуктов газовыделения. Приводимые справочные данные относительно значений параметров А и В (в равной мере q_0 и ∞) являются по своей сути интегральными характеристиками процессов газовыделения. В этой связи вопрос об определении среднего молекулярного веса продуктов дегазации (в особенности это относится к низкомолекулярным компонентам) остается открытым. Тот факт, что эта трудность не носит принципиального характера, мало что меняет, поскольку определение параметров газовыделения и с учетом парциаль-

ного состава газовых компонент сопряжено с чрезвычайными трудностями практического характера.

Вторая трудность может быть отнесена к разряду принципиальных и обусловлена правомерностью сравнения газового состояния для рассматриваемого вопроса. (Здесь уместно упомянуть о замечаниях, приведенных в разделе 2.2.1).

Учитывая последнее замечание, следует полагать, что корректное решение вопроса о нахождении массовых эквивалентов объемных характеристик процесса газовой выделения следует искать в рамках теории неравновесной термодинамики и статистической физики, что сопряжено со значительными трудностями практического и принципиального характера ввиду незавершенности этих теоретических дисциплин как таковых.

В свете изложенного, проводимые ниже оценки суммарной массовой скорости газовой выделения конструкционных материалов КА следует рассматривать в качестве первого приближения решения поставленного вопроса.

Используя уравнения газового состояния, представим объемные характеристики газовой выделения в виде:

$$Q_{cr} = pV = R_r (m_{cr}/M_0)T; \quad (2.2.11)$$

$$Q_r = pV = R_r (m_r/M_0)T, \quad (2.2.12)$$

где m_{cr} – массовая скорость продуктов газовой выделения;

m_r – суммарная масса продуктов газовой выделения;

p, V – эквивалентное давление и объем выпускаемых продуктов газовой выделения;

R_r – универсальная газовая постоянная;

M_0 – молярная масса, численно равная относительной молекулярной массе.

Некорректность использования уравнения состояния обусловлена тем, что в нашем случае понятие о давлении лишено смысла. Продукты дегазации существуют в виде молекулярных потоков с малыми параметрами рассеяния, поскольку космический вакуум выступает в роли весьма эффективных откачных

средств с удельными скоростями откачки, равными теоретической (по воздуху) $1,2 \cdot 10^5 \text{ л} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$

Таким образом, для массовых характеристик процессов дегазации имеем:

$$m_{cr} = (Q_{cr} M_o) / (R_r T); \quad (2.2.13)$$

$$m_r = (Q_r M_o) / (R_r T). \quad (2.2.14)$$

В рамках параметров газовыделения А и В последние выражения имеют вид:

$$m_{cr} = (M_o \sum S^i 10^{A'-B't}) / (R_r T); \quad (2.2.15)$$

$$m_r = (M_o \sum 10^{A'} \int_0^T 10^{-B't} dt) / (R_r T). \quad (2.2.16)$$

В соответствии с выражением (2.2.16) можно оценить значения предельной массы продуктов газовыделения:

$$m_r (\text{пред}) = (M_o \sum [S^i 10^{A'}] / (2,3B^i)) / (R_r T). \quad (2.2.17)$$

Последнее выражение представляет определенный практический интерес в свете возможности оценки предельных значений масс, обуславливающих появление непредсказуемых загрязняющих покрытий на поверхности КА.

Пример оценочного расчета параметров m_r и m_{cr}

В табл. 2.13 и 2.14 представлены результаты оценочного расчета массовых характеристик продуктов дегазации КА конкретного типа. (Исходные параметры расчета приведены в табл. 2.11 и 2.12).

Согласно литературным данным, $M = 25$ для низкомолекулярных летучих компонент, $M_o = 50-200$ для высокомолекулярных продуктов деструкции полимерных покрытий. Сформулируем ряд выводов на основании допущения, что $M = 25$:

- максимальная скорость газовыделения в начальный момент функционирования КА составляет $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ г} \cdot \text{с}^{-1}$;

- суммарная масса продуктов газовой выделения оценивается величиной 425 г и достигает своего предельного значения после 10^2 ч эксплуатации объекта в условиях КП;
- на конечном этапе функционирования КА (10^2 ч) массовая скорость газовой выделения соответствует квазистационарному этапу дегазации конструкционных материалов.

В заключение отметим, что полученные массовые характеристики процесса дегазации КА находятся в удовлетворительном согласии с данными литературных источников.

Таблица 2.13. Результаты оценочного расчета суммарной массы продуктов газовой выделения конструкционных материалов КА конкретного типа при различных продолжительностях функционирования КА

Относительная молекулярная масса продуктов дегазации M'_0	Суммарная масса продуктов газовой выделения / г					
	(пред)	1 ч	10 ч	10^2 ч	$5 \cdot 10^2$ ч	10^3 ч
1	17	0,31	2	9,6	16	17
5	85	1,55	10	48	80	85
10	170	3,1	20	96	160	170
15	255	4,6	30	144	240	255
20	340	6,1	40	192	320	340
25	425	7,7	50	240	400	425
30	510	9,3	60	288	480	510
50	850	15,5	100	480	800	850
100	1700	31	200	960	1600	1700

Примечания: 1. Геометрические параметры материалов (элементов) и параметры их газовой выделения представлены в табл. 2.11.

2. Исходные данные расчетов представлены в табл. 2.11 (Величины итоговых потоков Q_T).

Таблица 2.14. Результаты оценочного расчета массовой скорости продуктов газовой выделения конструкционных материалов КА конкретного типа в различные моменты времени функционирования КА

Относительная молекулярная масса продуктов дегазации M'_0	Массовая скорость газовой выделения, $г \cdot с^{-1}$					
	(пред)	1 ч	10 ч	10^2 ч	$5 \cdot 10^2$ ч	10^3 ч
1	$8,8 \cdot 10^{-5}$	$7,6 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	$9,2 \cdot 10^{-9}$
5	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-8}$
10	$8,8 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-6}$	$9,2 \cdot 10^{-8}$
15	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$8,4 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$
20	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$
25	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-7}$
30	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$
50	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-7}$
100	$8,8 \cdot 10^{-3}$	$7,6 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$9,2 \cdot 10^{-7}$

Примечания: 1. Геометрические параметры материалов (элементов) и параметры их газовой выделения представлены в табл. 2.11.

2. Исходные данные расчетов представлены в табл. 2.12 (Величины итоговых потоков Q_{cr}).

Таблица 2.15. Результаты оценочного расчета в приповерхностной области Ка в различные моменты времени функционирования КА

Наименование материала (элемента) конструкции	Относительная молекулярная масса M'_0	Концентрация газовых молекул Пг, $м^{-3}$				
		0 ч	1 ч	10 ч	10^2 ч	10^3 ч
Металлы $A = -3$ $B = 3 \cdot 10^{-5}$	1	$2,7 \cdot 10^{16}$	$2,0 \cdot 10^{16}$	$2,2 \cdot 10^{15}$	$4,1 \cdot 10^5$	$4,0 \cdot 10^2$
	16	$1,0 \cdot 10^{17}$	$8,0 \cdot 10^{16}$	$8,8 \cdot 10^{15}$	$1,6 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^5$
	25	$1,3 \cdot 10^{17}$	$1,0 \cdot 10^{17}$	$1,1 \cdot 10^{16}$	$2,1 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^5$
	36	$1,6 \cdot 10^{17}$	$1,2 \cdot 10^{17}$	$1,3 \cdot 10^{16}$	$2,5 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^5$
	100	$2,6 \cdot 10^{17}$	$2,0 \cdot 10^{17}$	$2,2 \cdot 10^{16}$	$4,1 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^5$

ТЗП: А = -2 В = Ю»6	1	$2,6 \cdot 10^{17}$	$2,6 \cdot 10^{17}$	$2,4 \cdot 10^{17}$	$1,1 \cdot 10^{17}$	$6,5 \cdot 10^{13}$
	16	$1,0 \cdot 10^{18}$	$1,0 \cdot 10^{18}$	$9,6 \cdot 10^{17}$	$4,5 \cdot 10^{17}$	$2,6 \cdot 10^{14}$
	25	$1,3 \cdot 10^{18}$	$1,3 \cdot 10^{18}$	$1,2 \cdot 10^{17}$	$5,7 \cdot 10^{17}$	$3,3 \cdot 10^{14}$
	36	$1,8 \cdot 10^{18}$	$1,5 \cdot 10^{18}$	$1,4 \cdot 10^{18}$	$6,8 \cdot 10^{17}$	$3,9 \cdot 10^{14}$
	100	$2,7 \cdot 10^{18}$	$2,6 \cdot 10^{18}$	$2,4 \cdot 10^{18}$	$1,1 \cdot 10^{18}$	$6,5 \cdot 10^{14}$

Примечания: 1. Расчетные данные получены при $T = 300$ К.

2. Эти и нижеследующие данные для металлов характеризуют квазистационарный режим дегазации.

2.2.4 Концентрация газовых молекул продуктов дегазации поверхности КА

Определение концентрации газовых молекул продуктов дегазации представляет интерес с двух точек зрения. Во-первых, значение КГМ продуктов дегазации в непосредственной близости от поверхности КА характеризует газовую обстановку в области пространства, представляющей большой интерес при рассмотрении физико-химических процессов, определяющих повреждающее воздействие факторов КП. Во-вторых, эти данные необходимы для построения в дальнейшем ЛРК в окрестности КА, обусловленной процессами дегазации КА.

Основные допущения, используемые при определении аналитической зависимости КГМ от параметров процессов дегазации, сводятся к следующему:

- поток десорбированных атомов (молекул) направлен нормально к плоскости испускания;
- коэффициент возврата первичного потока дегазации равен нулю;
- испускающая поверхность является плоской.

Последнее допущение не умаляет общности конечных результатов, а преследует цель упрощения задачи.

Удельная массовая скорость ($\Gamma \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$) имеет вид

$$m_{\text{ср}} (\text{уд}) = (q(t) M_0) / (R_{\Gamma} T), \quad (2.2.18)$$

где $q(t)$ – удельная объемная скорость дегазации.

В свете оговоренных допущений объем, занимаемый продуктами дегазации, испускаемыми с единицы площади поверхности материала, равен скорости газовых молекул. Следовательно, приповерхностная КГМ продуктов дегазации может быть выражена в виде

$$n_r = N / V = m_{cr} (\text{уд}) / (M'_o m_a v), \quad (2.2.19)$$

где N – полное количество молекул, испускаемых в единицу времени с единичной площади;

V – объем, занимаемый N молекулами;

M'_o – относительная молекулярная масса;

m_a – атомная единица массы.

В развернутом виде для n_r имеем:

$$n_r = (10^3 q(t)) / (R_r T m_a v). \quad (2.2.20)$$

Если испускаемые молекулы находятся в тепловом равновесии с поверхностью КА ($v = v_r$), выражение (2.2.20) приводится к виду

$$n_r = 10^{-10} q(t) [(N_A M'_o) / (3m_a - R_r^3 T^3)]^{1/2}, \quad (2.2.21)$$

где N_A – число Авогадро.

Поскольку последнее выражение используется в дальнейшем для количественных оценок КГМ, представим его в рамках параметров дегазации A и B (см.раздел 2.1.2):

$$n_r = 10^{(A-3)-Bt} [N_A / (3m_a R_r^3)]^{1/2} [M'_o / T]^{1/2}. \quad (2.2.22)$$

Пример оценочного расчета концентрации n_r

В табл. 2.15 приведены результаты оценочного расчета КГМ вблизи поверхности КА для двух типов конструкционных материалов:

- металлы ($A = -3$; $B = 3 \cdot 10^{-5}$);
- ТЗП ($A = -2$; $B = 10^6$).

Рассчитанный спектр относительных молекулярных масс укладывается в интервал 1-100 а.е.м. На основании приведенных в табл. 2.15 данных можно сформулировать ряд выводов (для $M'_0 = 25$):

- Максимальное значение поверхностной КГМ в начальный момент времени функционирования КА оценивается величинами:

$1,3 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ – для металлов;

$1,3 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ – для компонентов (ТЗП).

- При отсутствии возвратных потоков после 100 часов функционирования КГМ у поверхности металлов снижается до незначительной величины $2,1 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$, а у композитов (ТЗП) – сохраняется на относительно высоком уровне $5,7 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$.

- На начальном этапе функционирования КГМ продуктов дегазации КА на 3-4 порядка превосходит КГМ невозмущенной атмосферы КП для рассматриваемых высот функционирования КА ($h \cong 300 \text{ км}$).

- На конечном этапе функционирования (1000 часов) КГМ продуктов дегазации и атмосферы КП имеют одинаковый порядок величин.

Возрастание на порядок КГМ при увеличении (от 1 до 100) находит свое объяснение в уменьшении тепловой скорости десорбированных газовых молекул. В этой связи следует ожидать, что концентрация олигомеров и продуктов деструкции полимеров может достигать более высоких значений, нежели приведенные в табл.2.15.

2.2.5 Эквивалентное давление продуктов дегазации у поверхности КА

Продукты находятся в окрестности КА в виде потоков, т.е. представляют по своей сути неравновесные образования. В этой связи говорить о давлении газовых молекул продуктов дегазации в рамках общепринятых представлений о давлении, как од-

ного из параметров равновесного состояния газовой среды, не представляется возможным.

В то же время ряд практических аспектов создания изделий космической техники, в частности испытания в режимах имитации реальных условий функционирования КА, предполагает использование понятия давления газовых сред. (Проведение испытаний в адекватных неравновесных условиях представляет значительные трудности). Поэтому представляется целесообразным в первом приближении ввести в рассмотрение понятия об эквивалентном давлении газовых молекул продуктов дегазации для целей постановки имитационных (модельных) исследований повреждающего воздействия СВА на элементы конструкций КА.

В свете вышеизложенного, для эквивалентного давления P_{Γ} имеем:

$$P_{\Gamma} = n_{\Gamma} k T . \quad (2.2.23)$$

Поскольку длина свободного пробега превышает размеры КА, поток продуктов дегазации в приповерхностной области пространства не успевает войти в равновесие с газовой средой КП.

В этой связи в выражении (2.2.23) фигурирует температура поверхности КА. С целью усиления направленности представления об эквивалентном давлении, как параметра, связанного с кругом вопросов, обуславливающих повреждающее воздействие факторов КП, целесообразно дополнить выражение (2.2.23) составляющими, определяющими возвратные потоки:

$$l_{\Gamma} = (n_{\Gamma} + n_{\text{в}}) kT , \quad (2.2.24)$$

где $n_{\text{в}}$ – КГМ возвратных потоков продуктов дегазации.

Пример оценочного расчета параметра P_2

Численные оценки эквивалентного давления, полученные на основании использования данных табл. 2.15 (при $T = 300 \text{ K}$; $M_0 = 25$) представлены в табл. 2.16.

В соответствии с полученными данными, можно сделать вывод о том, что у поверхности материалов на полярной основе даже на конечном этапе функционирования (1000 ч) эквивалентное давление равно $1,4 \cdot 10^{-6}$ Па ($1,1 \cdot 10^{-8}$ мм рт.ст.).

Таблица 2.16. Результаты оценочного расчета эквивалентного давления продуктов дегазации у поверхности КА

Наименование материала (элемента) конструкции	Эквивалентное давление Па/мм.рт.ст.				
	0 ч	1 ч	10 ч	100 ч	1000 ч
Металлы	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$8,7 \cdot 10^{-15}$	$8,0 \cdot 10^{-15}$
	$4,1 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$6,5 \cdot 10^{-17}$	$5,6 \cdot 10^{-17}$
ТЗП	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-6}$
	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$

Примечание. Данные соответствуют квазистационарному режиму дегазации КА.

2.3 Параметры аэрозольной составляющей выбросов ДУ

При анализе аэрозольной составляющей СВА принято рассматривать аэрозольные образования (при отсутствии прочих специфических источников) топливных компонент в переходных режимах работы ДУ [97-103]. В оценках точности и однородности распыла используются получаемые экспериментальным путем зависимости распределения относительного числа капель, объема или веса по размерам капель (рис. 2.6). Эти зависимости принято называть характеристиками распыливания. По оси абсцисс характеристик распыливания откладывают диаметр капель, а по оси ординат – относительное число капель \bar{N}_s , их суммарный объем \bar{V} или вес \bar{G} , диаметры которых равны и меньше отложенного. Дифференцирование зависимости относительного

числа капель, их объема или веса по размеру дает кривую относительной частоты капель отдельных размеров \overline{N}_n . Чем ближе к оси ординат располагается характеристика распыливания и чем четче проявляется максимум кривой относительной частоты капель, тем более тонким и однородным является распыл жидкости.

Тонкость распыла принято характеризовать некоторым средним диаметром капли распыленной жидкости. На практике в качестве характеристики тонкости используется так называемый медианный диаметр. За средний, медианный, диаметр капель условно принимается тот диаметр, которому на характеристиках распыливания (рис. 2.7) соответствует относительный вес капель, равный 50%.

Основными факторами, определяющими тонкость и однородность распыла топлива форсунками, являются перепад давления $\Delta\rho_{\text{ф}}$, геометрические размеры форсунки, давление среды, в которую впрыскивается топливо, а также вязкость и поверхностное натяжение топлива, определяемое его физическими свойствами и начальной температурой.

При увеличении перепада давлений на форсунке $\Delta\rho_{\text{ф}}$ возрастает скорость истечения топлива, что приводит к увеличению сил взаимодействия струи с газовой средой. Имеет место также нарастание турбулентности. Оба эти фактора способствуют повышению тонкости и однородности распыла (рис. 2.8). Однако увеличение $\Delta\rho_{\text{ф}}$ вначале приводит к интенсивному повышению тонкости распыла, а затем его влияние становится все меньшим. Вместе с тем при увеличении перепада давлений на форсунках возрастают необходимая мощность и, соответственно, вес агрегатов системы подачи топлива.

Перепады давлений на форсунках, выполненных ЖРД составляют обычно $\Delta\rho_{\text{ф}} = 5-15 \text{ кг/см}^2$. При таких перепадах и расходах компонента топлива на форсунку 150-500 г/с получают поток капель с медианным диаметром $d_M = 100-150 \text{ мк}$.

Чем больше при данном перепаде давлений расход топлива, на который рассчитана форсунка, тем больше диаметр ее выходного сопла и толще струя истекающего топлива. С увеличением площади поперечного сечения струи уменьшается отно-

шение поверхности струи к ее объему и оказывается относительно меньшим разрушающее влияние поверхности сил взаимодействия струи с газом. Поэтому форсунки, рассчитанные при прочих равных условиях на больший расход топлива, обеспечивают менее тонкий распыл. Это положение хорошо иллюстрируют рис. 2.7-2.10, на которых показаны зависимости медианного диаметра от перепада давлений Δp_{ϕ} для трех струйных форсунок, рассчитанных на разные расходы топлива и имеющих соответственно разные диаметры сопел.

Существенное влияние на тонкость распыла оказывает давление среды, в которую осуществляется подача топлива. Динамическое воздействие среды на частицы жидкости пропорционально ее скоростному напору $\rho\omega^2/2$ в относительном движении. При увеличении давления среды ее плотность и, соответственно, скоростной напор возрастают и жидкость дробится на более мелкие частицы. Это видно из рис. 2.3, на котором показаны характеристики распыливания для струйной форсунки, работающей при постоянном перепаде давлений и различных давлениях среды, в которую впрыскивается жидкость. Об увеличении тонкости распыла свидетельствует смещение кривых относительных частот капель к оси ординат при увеличении давления среды.

Дальнобойность струи характеризуется глубиной проникновения распыленного топлива в газовую среду камеры сгорания в единицу времени. Учет дальнобойности при проектировании головки камеры сгорания весьма важен. При неправильном подборе форсунок по их дальнобойности возможно расслоение отдельных компонентов, затрудняющее процесс последующего смесеобразования. Напротив, правильное использование форсунок с различной дальнобойностью, позволяющее рассредоточить горение по объему камеры, положительно влияет на надежность и устойчивость процесса горения.

Угол факела распыла представляет собой плоский угол между касательными к контуру струи. Этот угол является характеристикой охвата объема камеры распыленной жидкостью. Для струйных форсунок угол факела распыла составляет $5-10^{\circ}$, для центробежных $45-120^{\circ}$.

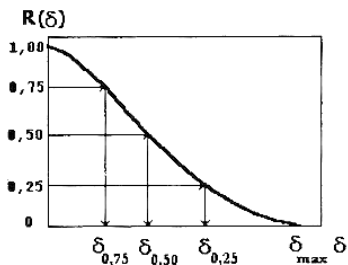


Рис. 2.1. Кривая полных остатков и характерные размеры порошка

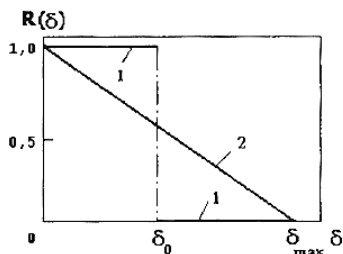


Рис. 2.2. Кривые распределения частиц по размерам:
1 – монофакция с частицами размером δ_0 ; 2 – равномерное распределение частиц в интервале $(0, \delta_{max})$

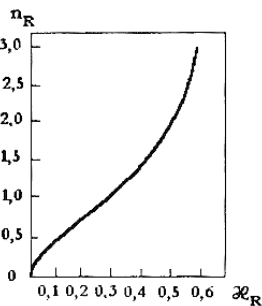


Рис.2.3. Связь параметров n_R и Z_R

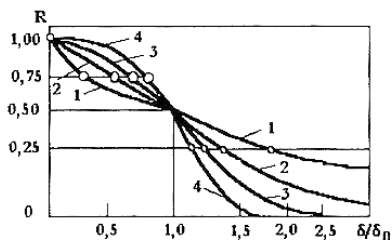


Рис.2.4. Кривые полных остатков при различных значениях Z_R :
1 – $Z_R=0,1$; 2 – $0,3$; 3 – $0,5$; 4 – $0,7$

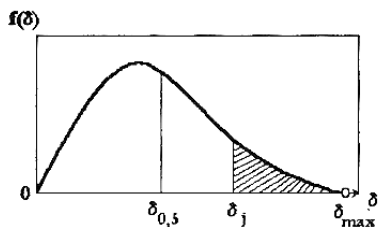


Рис. 2.5. Дифференциальная кривая распределения. Заштрихованная площадь равна остатку $R(\delta_j)$

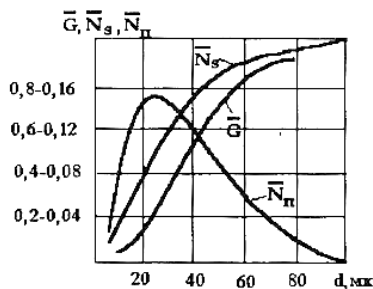


Рис. 2.6. Характеристика распыливания

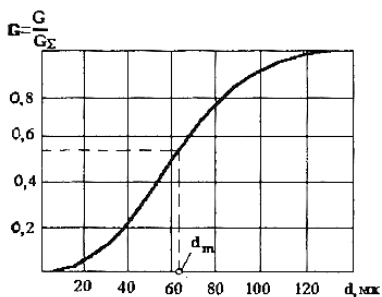


Рис. 2.7. К определению медианного диаметра

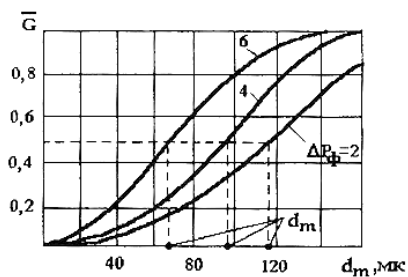


Рис. 2.8. Характеристика распыливания при разных перепадах давления на форсунке ΔP_ϕ

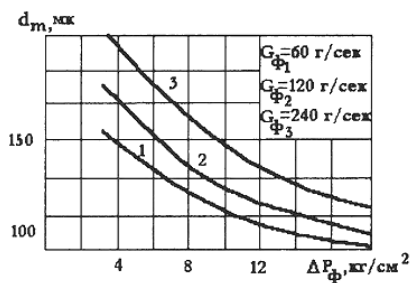


Рис. 2.9. Зависимость медианного диаметра от перепада давлений для струйных форсунок, рассчитанных на разные расходы жидкости

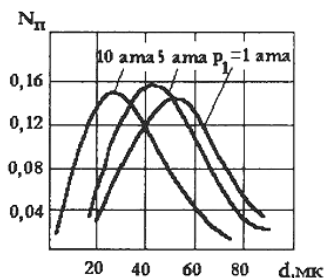


Рис. 2.10. Зависимость медианного диаметра от давления среды для струйной форсунки, работающей при постоянном перепаде давления

3 УДЕЛЬНЫЕ УРОВНИ КОНДЕНСАЦИИ НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОТ РАБОТЫ ДУ

3.1 Постановка задачи

Целью задачи является определение удельной массы конденсата, осаждающегося на поверхность ПГ за время работы двигательных установок (рис. 3.1). Кроме того, в задачу входит определение наиболее неблагоприятной поверхности ПГ. Конечным результатом должна являться оценка уровня конденсации сверху, в связи с этим выдвинут ряд гипотез, завышающий результаты расчета:

а) нестационарный процесс расширения струи двигательной установки заменяется стационарным с максимальной плотностью;

б) предполагается, что вся масса, распределенная по факелу диффузно, изотропно рассеивается;

в) все молекулы, соударяющиеся с поверхностью конденсации, прилипают к ней.

3.2 Методология расчета уровня конденсации

Исходные данные:

а) параметры, характеризующие положение поверхности конденсации;

б) параметры, характеризующие расположение ДУ;

в) характеристики ДУ (секундный расход массы, скорость газа на выходе, состав выброса).

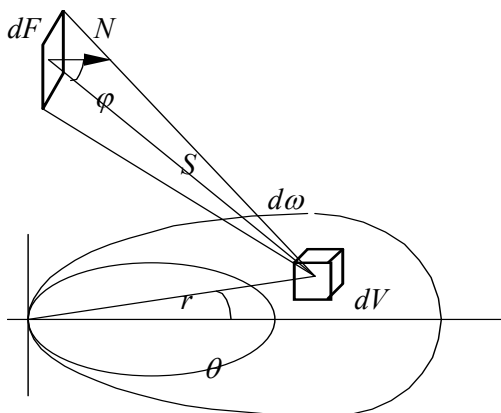


Рис. 3.1. Расчетная схема для определения удельного уровня конденсации

В качестве модели струи принята аппроксимационная зависимость плотности в дальнем поле течения струи [7,8]:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{a}{2} \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \cos^a \theta \quad (3.2.1)$$

где $a = \gamma(\gamma - 1)M_0^2$; γ – отношение теплоемкостей; M_0 – число Маха на срезе сопла; r_0 – радиус среза сопла; ρ_0 – плотность на срезе сопла.

Выбор модели струи обусловлен тем обстоятельством, что определяющую роль в процессе загрязнения поверхности ПГ играют периферийные области струи.

Вся масса, заключенная в объеме dV струи, диффузно изотропно рассеивается. В этом случае доля массы, рассеиваемой в направлении площадки dF :

$$dM_n = \frac{\cos \varphi dF}{4\pi S^2} \rho dV \quad (3.2.2)$$

Для учета молекулярных потерь путь S разбивается на k участков, в пределах каждого из которых используется концепция длины свободного пробега:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2n\sigma}}, \quad (3.2.3)$$

где $n = \rho/M_0$ – концентрация; M_0 – молекулярная масса продуктов выброса ДУ; σ – сечение взаимодействия.

Тогда удельная масса, ежесекундно осаждающаяся на площадку dF , будет определяться выражением:

$$dM_{v\sigma} = \frac{dM}{dF}. \quad (3.2.4)$$

Изложенная методика была реализована в универсальной программе на ЭВМ, которая может быть адаптирована под любой тип ЛА.

3.3 Схема программы расчета удельного уровня конденсации

Для расчета разработана программа на ЭВМ, определяющая удельный уровень конденсации в зависимости от расположения ДУ и поверхности конденсации. Она проводит расчет и может быть адаптирована под любой тип ЛА. Блок-схема программы приведена на рис.3.2.

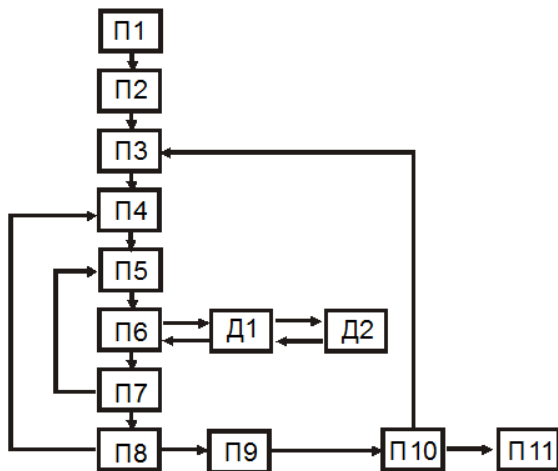


Рис. 3.2. Схема программы расчета на ЭВМ

Обозначения, принятые на схеме:

П1 – установка исходных данных;

П2 – инициализация внутренних переменных: параметров разбиения, массивов данных и т.п.

П3 – выбор площадки dF на поверхности конденсации;

П4 – выбор ДУ;

П5 – выбор объема dV в струе двигательной установки;

П6 – вычисление массы, рассеиваемой из объема dV в направлении площадки dF ;

Д1 – определение видимости площадки dF из объема dV ;

Д2 – расчет потерь на пути от площадки dF до объема dV ;

П7 – переход к следующему объему;

П8 – переход к следующей ДУ;

П9 – запоминание результата;

П10 – переход к следующей площадке;

П11 – построение графика распределения удельной массы конденсата по поверхности.

3.4 Результаты машинного эксперимента по определению удельного уровня конденсации (пример: КА “ГЛОБАЛСТАР”)

Для проведения машинного эксперимента программа расчета была адаптирована для произвольной геометрии ЛА. Расчеты показывают, что наиболее загрязненной от работы ДУ является боковая поверхность каждого из спутников 1-3 (рис. 3.3). В ходе работы был получен график распределения удельной массы конденсата по поверхности (рис.3.4).

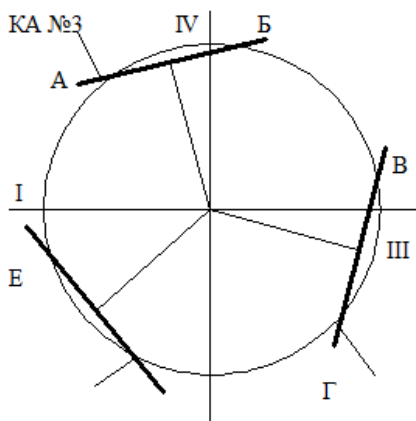


Рис. 3.3. Схема расположения поверхностей конденсации

Определен вклад отдельных ДУ в процесс конденсации продуктов выброса (рис. 3.5-3.7). Выявлена наиболее неблагоприятная с точки зрения загрязнения поверхность (АБ). Установлено также, что определяющую роль в процессе конденсации на поверхность АБ играют ДУ x_1 и x_2 .

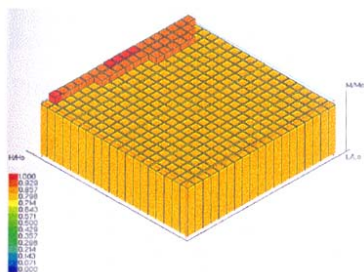


Рис.3.4. Масса от всех ДУ.
 $M=2,4 \cdot 10^{-10}$ кг/кв·м·с

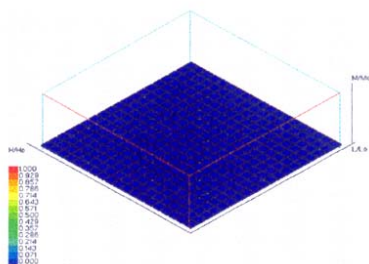


Рис.3.5 Масса от маршевой ДУ.
 $M=5,8 \cdot 10^{-12}$ кг/кв·м·с

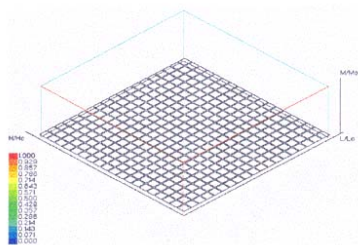


Рис.3.6 Масса от x1.
 $M=3,2 \cdot 10^{-13}$ кг/кв·м·с

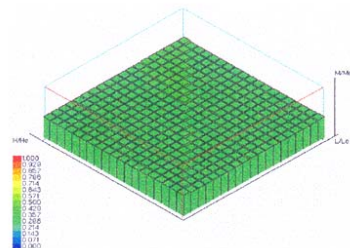


Рис.3.7 Масса от x2.
 $M=1,0 \cdot 10^{-10}$ кг/кв·м·с

На рис. 3.4– 3.7: H_0 – высота поверхности, L_0 – длина поверхности, M_0 – максимальная удельная масса конденсата, осаждающегося на поверхность.

Установлено, что качественная картина распределения массы для боковой поверхности спутников №1 и №2 аналогична представленной на рис.3.4. Максимальные удельные уровни конденсации для этих поверхностей составляют $2,2 \cdot 10^{-10}$ кг/кв.м·с и $2,1 \cdot 10^{-10}$ кг/кв.м·с соответственно.

В ходе работы установлен тот факт, что верхние поверхности всех четырех спутников не испытывают загрязнения от работы ДУ. Кроме того, остаются незагрязненными поверхности спутников №1,2,3, прилегающие к центральной стойке.

Для всех четырех боковых граней спутника №4 картина распределения массы аналогична представленной на рис.3.8. Максимальный удельный уровень конденсации от работы ДУ для этих поверхностей составляет $1,7 \cdot 10^{-10}$ кг/кв.м.с.

Определено, что удельный уровень конденсации от работы ДУ на остальных поверхностях всех четырех спутников много меньше максимального уровня загрязнения, соответствующего поверхности АБ (см. рис. 3.3).

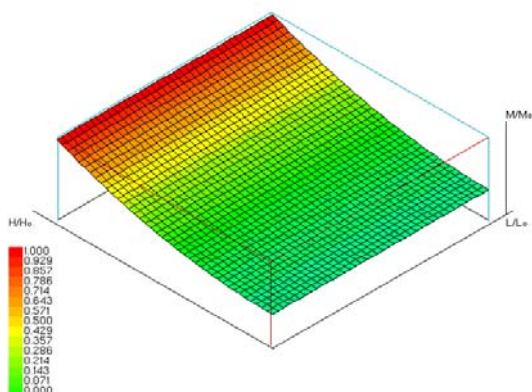


Рис. 3.8. Распределение массы по боковой поверхности спутника №4

3.5 Расчет удельного уровня конденсации низкомолекулярных соединений от газовыделения конструкционных материалов

3.5.1 Постановка задачи

Целью задачи является определение удельной массы конденсата, осаждающегося на поверхность ПГ от процессов дегазации конструкционных материалов. Для оценки уровня конденсации сверху выдвинуты следующие гипотезы:

- а) поверхность испускает молекулярные потоки изотропно;

б) все молекулы, соударяющиеся с поверхностью конденсации, прилипают к ней.

3.5.2 Методология расчета уровня конденсации

При решении задачи считается, что поверхностью дегазации является поверхность БВ. В этой связи, в силу симметрии, можно считать, что уровень конденсации для боковых поверхностей ПГ (см. рис. 3.3) будет одинаковым. На рис.3.9 представлена расчетная схема для определения удельного уровня конденсации.

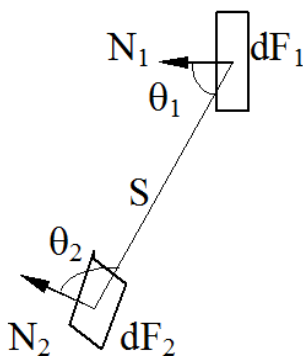


Рис. 3.9. Расчетная схема для определения удельного уровня конденсации от процессов дегазации конструкционных материалов

Площадка dF_2 испускает массу по диффузному закону. Удельная масса будет определяться выражением

$$dM_{-л} = \frac{dM}{dF} . \quad (3.5.1)$$

При расчете необходимо определять видимость площадки dF_1 с площадки dF_2 и учитывать эффекты затенения.

3.5.3 Алгоритм программы расчета удельного уровня конденсации

Для определения уровня конденсации была разработана универсальная программа на ЭВМ и может быть адаптирована под ЛА любой геометрии. Блок-схема программы представлена на рис.3.10.

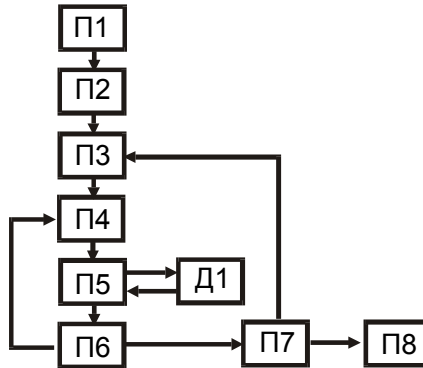


Рис. 3.10. Блок-схема программы расчета уровня конденсации
продуктов газовой выделения конструктивных материалов

Обозначения на схеме:

П1 – установка исходных данных;

П2 – инициализация внутренних переменных программы;

П3 – выбор площадки на поверхности ПГ;

П4 – выбор площадки на поверхности БВ;

П5 – определение молекулярных потоков, попадающих с
площадки БВ на площадку ПГ;

Д1 – определение видимости площадки БВ с площадки ПГ;

П6 – переход к следующей площадке БВ;

П7 – переход к следующей площадке ПГ;

П8 – вывод результатов расчета.

**3.5.4 Результаты машинного эксперимента
по определению удельного уровня конденсации
низкомолекулярной составляющей
от процессов газовыделения конструкционных материалов
ЛА “Глобалстар”**

Для определения уровня конденсации продуктов газовыделения конструкционных материалов программа была адаптирована для конкретного ЛА. При этом было учтено реальное расположение материалов (табл. 3.1) на БВ.

Таблица 3.1. Параметры газовыделения композиционных материалов

№ п/п	Марка материала	ОПМ, %	ЛВК, %
1	ЭВТИ	0,9	0,08
2	Эмаль – 4081	0,7	0,21
3	Стеклопластик	0,9	0,02

При проведении машинного эксперимента были получены распределения массы от процессов газовыделения конструкционных материалов для всех поверхностей ПГ. Распределение массы по боковым поверхностям спутников № 1, 2, 3 приведено на рис. 3.12. Максимальный уровень конденсации для них составляет $4,1 \text{ мг/м}^2$. Распределение массы по нижним поверхностям спутников № 1, 2, 3 приведено на рис.3.13. Здесь все три поверхности заменены эквивалентным диском конденсации (рис. 3.11) Максимальный уровень конденсации для нижних поверхностей составляет $6,8 \text{ мг/м}^2$. Установлено, что поверхности спутника №4 не испытывают загрязнения от процессов газовыделения конструкционных материалов. Для всех остальных поверхностей ПГ уровень загрязнения много меньше максимального ($6,8 \text{ мг/м}^2$).

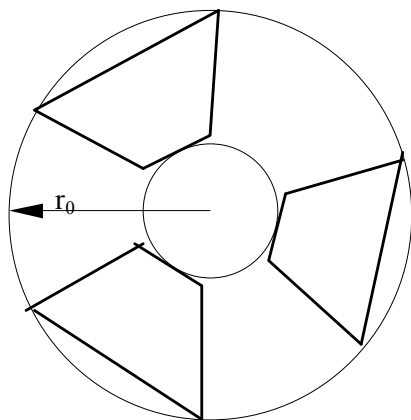


Рис.3.11. Замена нижних поверхностей спутников эквивалентным диском

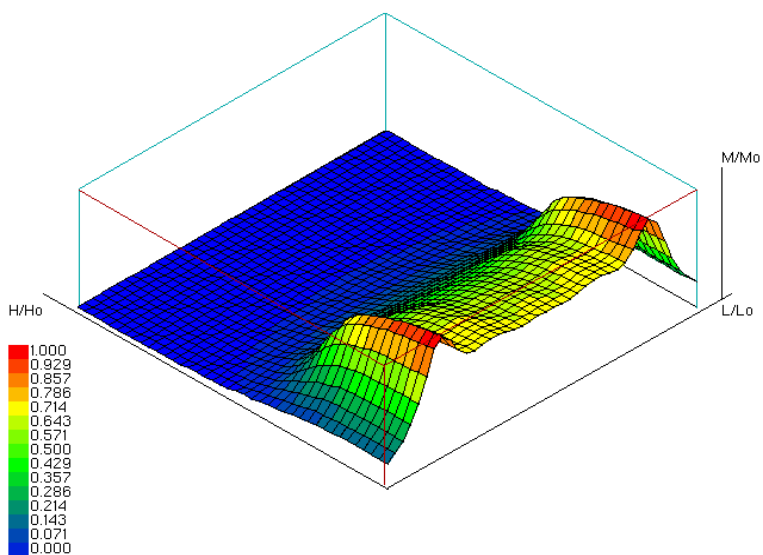


Рис.3.12. Распределение удельной массы конденсата по боковой поверхности спутников

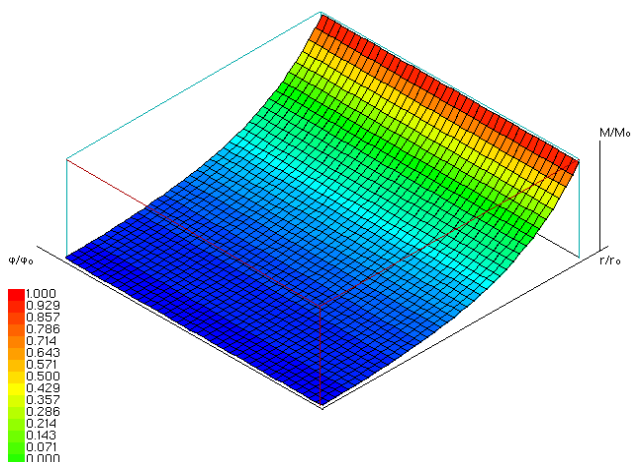


Рис. 3.13. Распределение удельной массы конденсата по нижней поверхности спутников (по эквивалентному диску). r_0 – расстояние от оси БВ до максимально удаленной от нее точки нижней поверхности ПГ

3.6 Расчет уровня концентрации пылевой компоненты

3.6.1 Постановка задачи

Целью данного раздела является определение загрязнения поверхности ПГ пылевыми частицами. Расположение БВ ИКАР с ПГ приведено на рис.3.14. При расчетах будем считать, что предельный уровень загрязнения поверхности БВ на момент сброса ГО определяется как уровень 750 в соответствии с нормами MIL-STD-1246 (не более 105000 частиц/0,1 м² размером 50 мкм, не более 9630 частиц/0,1 м² размером 100 мкм, не более 231 частицы/0,1 м² размером 250 мкм, не более 8 частиц/0,1 м² размером 500 мкм, не более 1 частицы/0,1 м² размером 750 мкм). Внешние поверхности ПГ на момент сброса ГО считаются абсолютно чистыми.

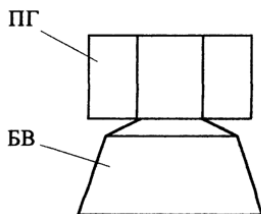


Рис. 3.14. Расчетная схема для определения уровня концентрации пылевой компоненты

Для оценки сверху уровня загрязнения пылевыми частицами примем следующие гипотезы:

- а) все частицы, находящиеся на БВ, рассеиваются;
- б) направление вылета частицы с поверхности носит равновероятный характер, что само по себе завышает результаты расчета;
- в) все частицы, попавшие на поверхность ПГ, прилипают к ней.

3.6.2 Алгоритм программы расчета уровня концентрации пылевой компоненты (БВ ИКАР с ПГ)

Для проведения машинного эксперимента была разработана программа на ЭВМ. Блок-схема программы представлена на рис.3.15.

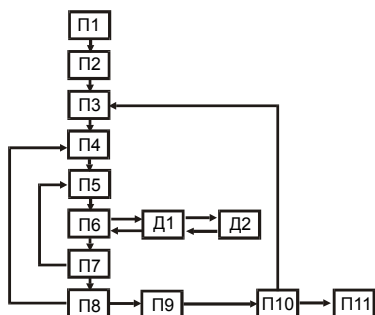


Рис. 3.15. Блок-схема программы расчета уровня концентрации пылевой компоненты

Обозначения на схеме:

П1 – установка исходных данных;

П2 – инициализация внутренних переменных программы;

П3 – выбор площадки на поверхности ПГ;

П4 – выбор площадки на поверхности БВ;

П5 – определение числа частиц, попадающих с площадки БВ на площадку ПГ;

Д1 – определение видимости площадки БВ с площадки ПГ;

П6 – переход к следующей площадке БВ;

П7 – переход к следующей площадке ПГ;

П8 – вывод результатов расчета.

3.6.3 Результаты машинного эксперимента по определению уровня концентрации пылевой компоненты

При проведении машинного эксперимента по определению уровня концентрации пылевой компоненты для КА «ГЛОБАЛ-СТАР» было установлено, что наиболее загрязненными пылевыми частицами являются нижние поверхности спутников №1-3. Для них получены следующие максимальные уровни загрязнения:

- число частиц размером 50 мкм не более $9460/0,1\text{ м}^2$;
- число частиц размером 100 мкм не более $810/0,1\text{ м}^2$;
- число частиц размером 250 мкм не более $23/0,1\text{ м}^2$;
- число частиц размером 500 мкм не более $0,8/0,1\text{ м}^2$;
- число частиц размером 750 мкм не более $0,09/0,1\text{ м}^2$.

Полученные результаты соответствуют уровню чистоты 500 по частицам.

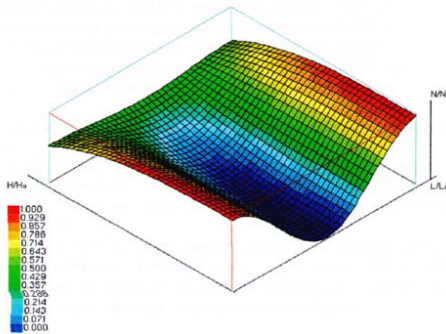


Рис. 3.16. Распределение пылевых частиц по внешней боковой поверхности спутников №1-4

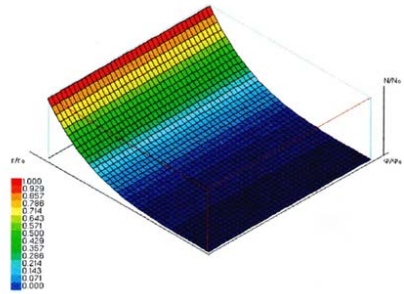


Рис. 3.17. Распределение пылевых частиц по нижним поверхностям спутников №1-3

Максимальные уровни загрязнения для внешней боковой поверхности спутников №1-3 составляют:

- число частиц размером 50 мкм не более $7568/0,1\text{ м}^2$;
- число частиц размером 100 мкм не более $664/0,1\text{ м}^2$;
- число частиц размером 250 мкм не более $17/0,1\text{ м}^2$;
- число частиц размером 500 мкм не более $0,63/0,1\text{ м}^2$;
- число частиц размером 750 мкм не более $0,07/0,1\text{ м}^2$.

Полученные результаты соответствуют уровню чистоты 500 по частицам.

Для остальных поверхностей спутников №1-3, а также для всех поверхностей спутника №4 установлено, что уровень загрязнения их много меньше уровня загрязнения внешних боковых поверхностей спутников №1-3.

Получено, что распределение частиц всех размеров по внешним боковым и нижним поверхностям спутников №1-3 аналогично представленным на рис.3.16 и 3.17 соответственно. Но – максимальный уровень загрязнения частицами.

4 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РЕГИСТРАЦИИ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ СВА КА

4.1 Предварительные замечания

Актуальность информации об образовании и эволюции пылевой компоненты (ПК) СВА КА связана с тем, что в настоящее время в составе бортовой аппаратуры КА применяются различные типы оптико-электронной аппаратуры для ориентации и навигации. Привязка к системе координат в ней осуществляется с помощью астрономических объектов (звезд, планет). Диапазон яркостей указанных объектов достаточно велик, и поэтому появление поле зрения аппаратуры астроориентации частиц пыли, рассеивающих свет Солнца либо другого источника освещенности, может рассматриваться как оптическая помеха, после обработки сигнала которой возможна выдача ложных команд управления на исполнительные органы КА, что приведет к нерасчетным режимам функционирования.

В настоящем разделе рассмотрены вопросы, связанные с визуальным наблюдением ПК, проведен анализ наземных технических средств измерения ПК, предложено несколько вариантов бортовых устройств для экспериментального исследования параметров ПК [104-115].

4.1.1 Визуальные наблюдения пылевых частиц с борта пилотируемых КА

Первые описания светящихся частиц принадлежат Г.С. Титову, пилотировавшему КА «Восток-2», и Дж Глену, пилотировавшему «Джемени».

Г.С. Титов сравнивал появление светящихся частиц с «идущим снегом». Качественные описания этого явления, кроме Г.С. Титова, дали А.Г. Николаев, В.Ф. Быковский, В.В. Терешкова.

В.Ф. Быковский наблюдал светящиеся частицы белого цвета каждый раз при выходе КА из тени, когда лучи Солнца не засвечивали иллюминатор. Размер частиц оценивался в 1-2 мм.

Некоторые количественные характеристики явления, по визуальным наблюдениям, были получены при последующих полетах космонавтов. В период выхода КА из тени (реже на дневном полушарии) за иллюминатором появлялись сравнительно медленно перемещающиеся светящиеся точки. В поле зрения 40-60° двигалось несколько частиц с яркостью 0-2^m звездной величины. Время пребывания в поле зрения 10-15 с [57].

По наблюдению Е.В. Хрунова с борта КА «Союз-4» после отделения КА от РН на дневной стороне Земли наблюдается большое количество светящихся частиц. Визуально они воспринимаются как звезды, наблюдаемые с Земли в темную ночь. Видимое количество светящихся частиц уменьшается со временем полета. Через 10-15 часов после начала полета наблюдаются отдельные частицы.

Яркость частиц варьируется примерно от яркости звезд до яркости Венеры и больше. Цвет частиц – белый. В теневой части КА цвет частиц – пепельный.

Самую большую яркость светящиеся частицы имеют в момент, когда Солнце находится у горизонта и направление визирования частиц составляет 90° к направлению Солнца.

В начальный период движение светящихся частиц хаотично, затем большая часть из них начинает перемещаться против вектора скорости, при этом некоторые частицы изменяют свое направление на глазах у наблюдателей без видимых внешних причин.

Свечение некоторых частиц устойчиво. Отдельные частицы мерцают, что говорит об их несферичности. Более детальное наблюдение светящихся частиц провел В.А. Шаталов с борта пилотируемых КА «Союз-4» и «Союз-8». По оценке космонавта после отделения КА от РН количество частиц составляло при-

мерно 103. При ударе по оправе иллюминатора образовалось примерно 10 частиц.

Размер в первом случае 1-2см. Наблюдались частицы до 1 см, похожие на капли жидкости.

С борта КА «Союз-8» В.А. Шаталовым выполнены наблюдения светящихся частиц после работы ДУ. Наблюдение велось в боковой иллюминатор, слегка развернутый назад. Двигатель был включен перед входом в тень. После выхода из тени наблюдался большой шлейф ярких частиц. Размер частиц в шлейфе 2-4 мм. Шлейф начинался прямо от КА. Он долго тянулся за кораблем.

4.1.2 Экспериментальные исследования параметров пылевой компоненты

Экспериментальные исследования пылевого окружения КА впервые были проведены в 1978г. на ДОС «Скайлаб» в экспериментах T025, T027.

Цель экспериментов – исследование облака частиц искусственного происхождения вокруг станции, вызывающего помехи при наблюдении астронавтами. Проводилось фотографирование облака частиц, измерение яркости свечения частиц пылевой компоненты (ПК) в лучах Солнца.

При проведении научных измерений на КА, летающих по программе «Шаттл», проводятся эксперименты с применением фотометрической стереопары. Использование двух фотометрических камер сделало возможным последовательные измерения расстояния между частицами с последующим измерением размеров частиц.

Первые эксперименты на отечественных КА были проведены на ДОС «Салют-4». Было проведено фотографирование частиц ПК, рассеивающих солнечный свет.

В дальнейшем эксперименты на более высоком уровне были проведены на КА «Зонд-5,6,8». Проведенные эксперименты можно разбить на два типа:

1. Эксперименты по изучению характеристик пылевой компоненты, возникающей в результате работы двухкомпонентных двигателей ориентации.

2. Эксперименты по изучению пылевой компоненты, образующейся за счет продуктов эрозии поверхностных материалов.

Эксперименты первого типа проводились с помощью автоматического фотометра, установленного на борту КА так, что ось зрения фотометра была параллельна одному из импульсных двигателей ориентации. При срабатывании этого двигателя фотометр регистрировал наибольшие световые импульсы.

На рис. 4.1 показана временная зависимость яркости световых импульсов от двигателей с параллельной ориентацией относительно оси зрения фотометра.

Кривая яркости имеет три характерных пика яркости. При анализе телеметрической информации было выявлено, что первый пик яркости появляется из-за переизлучения света вспышки топлива или Солнца на твердофазных частицах промежуточных продуктов реакции субмикронного размера. Этот пик яркости появляется и при работе фотометра в глубокой тени Земли.

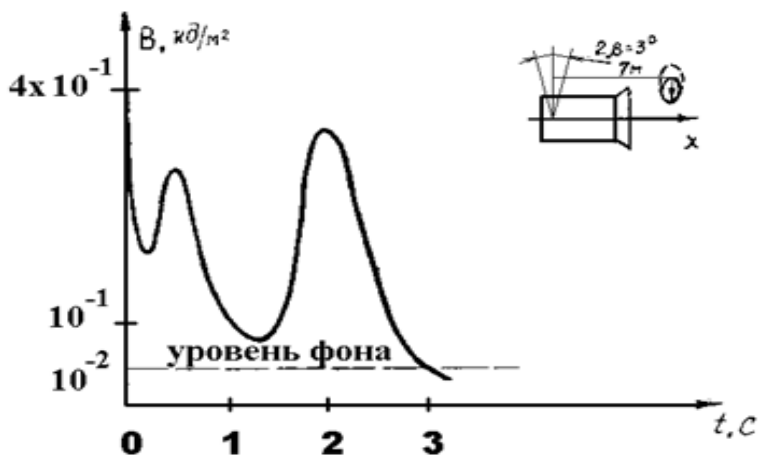


Рис. 4.1. Трехпиковая фотохронограмма яркости помехи при $\alpha=32^\circ$

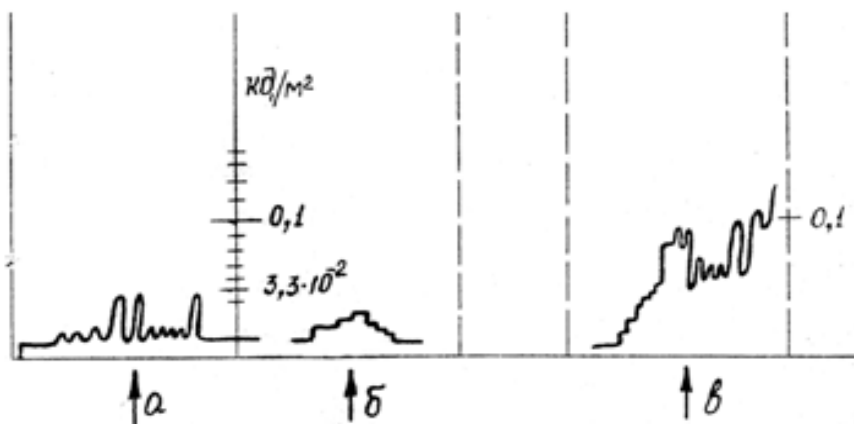


Рис. 4.2. Фотохронограмма рассеяния света частицами в окрестности Луны космической станции «Зонд-6»

Два последних пика появляются только из-за рассеяния солнечного света на твердых частицах продуктов выхлопа.

Эффективный размер частиц, формирующих третий пик яркости, примерно равен $2,56 \cdot 10^{-5}$ см.

Эксперименты второго типа проводились с помощью автоматического фотометра, который имел угол конуса поля зрения $2\beta=3^\circ$, диапазон измеряемых яркостей $10^{-3} \div 10^3$, в спектральной области $-300 \div 600$.

Обработка данных автоматического фотометра показала, что он зарегистрировал рассеяние света большого числа довольно крупных частиц. На рис. 4.2 представлены три типичных фотохронограммы отдельных частиц.

По оси абсцисс отложено время пребывания частиц в поле зрения фотометра. По оси ординат – приведенная к углу зрения фотометра «яркость» рассеянного частицей света.

Частицы «а» и «в» мерцают, что видно из разброса их яркости. Это говорит об их несферичности.

По фотохронограммам можно проводить оценку радиальной и тангенциальной (угловой скорости) компонент скорости.

Оценка радиусов частицы проводилась по соотношению:

$$r = 2R\sqrt{(E/E_0)(1/K)},$$

где R – расстояние до частицы;

E – значение блеска;

E_0 – интенсивность солнечного света вне атмосферы;

K – коэффициент зеркального отражения.

Для частиц, подчиняющихся Ламбертовскому закону отражения:

$$r = 2R\sqrt{(E/E_0)(1/\rho(\varphi))}.$$

Расчетный эффективный радиус частицы «в» $r \geq 5 \cdot 10^{-2}$ см.

На рис. 4.3 показана фотохронограмма рассеяния солнечного света на облаке частиц, появившихся при встряске КА «Зонд-6» на орбите Земли на высоте 200 км. Момент встряски отмечен стрелкой.

Уменьшение яркости свечения рассеянного света указывается на удалении частиц из поля зрения фотометра за счет аэродинамического торможения.

При анализе данных от фотометра было показано, что число частиц, наблюдаемых фотометром при $\tau=21$ с примерно 150, а общее число частиц, покинувших поверхность КА при встряске, примерно 150тыс.

4.1.3 Повреждающее воздействие ПК

По результатам проработки информационных источников наиболее сильно повреждающее воздействие ПК проявилось при полете КА «Маринер-4», когда при обработке телеметрической информации была обнаружена серия сбоев в работе астроизмерительных приборов, приведшая к выдаче ложных команд [60].

В дальнейшем был проведен наземный эксперимент по моделированию отказов при захвате АБУ светящейся частицы пыли.

Анализ сигналов ТМИ подтвердил предварительное предположение об отказе АБУ из-за появления в поле зрения светящейся частицы.

Кроме этого, частицы ПК могут попадать в приводы блока оптики АБУ, что приводит к снижению точности ориентации.

4.2 Происхождение пылевых частиц

По результатам визуальных наблюдений и экспериментов был выдвинут ряд предположений о природе возникновения частиц.

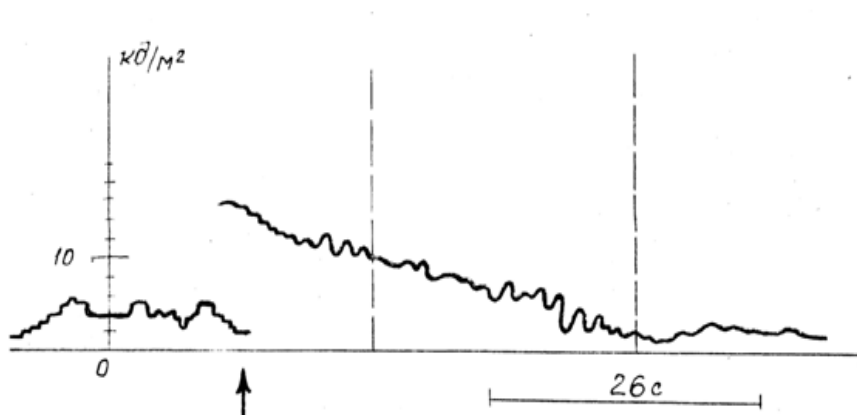


Рис. 4.3. Фотохронограмма рассеивания света облаком частиц при резкой встряске космической станции «Зонд-6» на земной орбите с высоты 200 км

4.2.1 Атмосферная и технологическая пыль

На различных этапах изготовления КА, его транспортировки, нахождения в МИКе, на стартовой позиции поверхность его покрывается частицами атмосферной пыли. Кроме того, при изготовлении материалов, образующих поверхность КА (маты

ЭВТИ), образуется технологическая пыль. В процессе полета при работе ДУ, пиротехнических устройств разделения и фиксации, а также других возмущающих факторов происходит удаление ПК с поверхности КА из-за вибрации корпуса.

4.2.2 Разрушение покрытия ЭВТИ

В процессе полета происходит разрушение ЭВТИ под воздействием ряда факторов [57].

К таким факторам можно отнести микрометеоритную эрозию (к микрометеоритам можно отнести и пыль, находящуюся в верхней атмосфере, так как столкновение ее частиц с поверхностью КА происходит на достаточно большой скорости).

Число соударений микрометеоритов с поверхностью КА примерно оценивается как $10^{-2} \div 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Если предположить, что при каждом столкновении может появиться несколько частиц, то их общее число может быть значительно.

4.2.3 Образование ПК при работе двигательных установок ориентации, коррекции и ДУ РН

При сливе неотработанных компонент топлива из последней ступени РН образуется большое облако светящихся частиц различного размера.

При сливе топлива образуются жидкие частицы, принимающие в невесомости сферическую форму. Затем вследствие интенсивного испарения температура частиц топлива значительно понижается до температуры затвердевания и образуются сферические частицы. Процесс, аналогичный описанному выше, происходит при вакуумировании топливных магистралей с непрореагировавшими компонентами топлива. К образующимся могут добавляться частицы пыли, находящиеся в самом топливе.

4.3 Влияние внешних сил на траекторию движения частиц пыли

4.3.1 Гравитационное притяжение

Сила гравитационного притяжения равна примерно $3 \cdot 10^6$ н, т.е. ускорение, испытываемое частицей [57], 10^{-5} см/с² для радиуса частицы $r=10^{-3}$ см и массы КА $5 \cdot 10^3$ кг.

Гравитационное притяжение Земли для такой частицы примерно в 10^7 раз больше. Заметное искривление траектории частицы в сторону КА на высотах сотни – тысячи километров заметить визуально невозможно. Влияние КА на искривление траектории скажется на высотах более 43000 км.

4.3.2 Световое давление

На орбитах 200-500 км световое давление равно примерно $4,4 \cdot 10^{-10}$ н, что создает у частицы радиусом $5 \cdot 10^{-3}$ см ускорение порядка 10^{-5} см/с². Эта величина заметного влияния на траекторию пылевой частицы существенно не оказывает [60].

4.3.3 Газокинетические силы

Оценка газодинамического лобового сопротивления движению частицы молекулами газа приведена в работе [60], где показано, что ускорение, создаваемое силой газокинетического сопротивления, для частицы больше, чем для КА, приблизительно в 10^4 раз. Величина ускорения частиц «убегающих» от КА при высоте орбиты около 200 км составит около 10 см/с² и 1 см/с² для частиц радиусов $5 \cdot 10^{-3}$ и $5 \cdot 10^{-4}$ см соответственно.

Для высоты орбиты в 400 км ускорение в 100 раз меньше.

Через 15 с после отделения частицы от КА ее относительная скорость достигнет 10 м/с и 10 см/с для высоты полета 200 и 400 км соответственно при радиусе частицы $r=5 \cdot 10^{-3}$ см.

Перечисленные примеры показывают, что в окрестности высокоорбитальных КА могут длительное время находиться частицы пыли, так как сопротивление среды уменьшается. При этом мелкие частицы будут отставать от КА быстрее крупных, так как у последних нагрузка на мидель меньше, таким образом происходит своеобразная селекция частиц по размерам.

4.3.4 Электростатические силы

При наличии у частицы пыли заряда на нее будут действовать электростатические силы, обусловленные влиянием собственного заряда КА. По оценкам, приведенным в работе [57], величина ускорения частицы, заряженной до 10^3 электронов, будет равна и более 8 см/с^2 , т.е. весьма существенной.

4.4 Оптические характеристики пылевой компоненты

4.4.1 Оценка оптических характеристик

По визуальным оценкам космонавтов [59] блеск частиц пыли составляет от 2^m до величины $(-4^m, 3)$, превышающей блеск Венеры, т.е. создают освещенность на зрачке наблюдателя от $5 \cdot 10^{-3}$ люкс до $5 \cdot 10^{-4}$ люкс.

Более полной характеристикой светящейся частицы является сила света, для сферических частиц (могущих возникать при сливе топлива при вакуумировании топливных магистралей) сила света отраженного солнечного излучения [58] приближенно может быть определена по формуле

$$I(\varphi) = \frac{2\rho_D}{3\pi} \cdot E_o [\sin \varphi + (\pi - \varphi) \cos \varphi] \cdot R^2,$$

где ρ_D – диффузный коэффициент отражения;

E_0 – освещенность, создаваемая солнцем вне атмосферы;

φ – угол отражения;

R – радиус частицы.

Для сферической частицы с радиусом = 0,1 мм соответственно:

$$I(\varphi=0^\circ)=3\cdot 10^{-4}кд \text{ и } I(\varphi=90^\circ)=1\cdot 10^{-4}кд .$$

4.4.2 Взаимосвязь между дальностью наблюдения пылевой частицы и ее оптическими характеристиками

По визуальным наблюдениям светящихся частиц пыли можно заключить, что частицы имеют наибольшую яркость (или блеск) в момент, когда Солнце находится у горизонта и направление визирования частицы составляет 90° от направления на Солнце.

В работе [58] приведены пороговые значения освещенности (блеска) при визуальном наблюдении светящихся частиц через боковой иллюминатор и иллюминатор, обращенный в сторону Солнца. Из приведенных в работе вычислений следует, что при наблюдении с высоты 250 км в сумеречной зоне (при углах возвышения Солнца над горизонтом не менее 15°) через боковой иллюминатор можно наблюдать светящиеся частицы (а также звезды и планеты) до 2^m - 3^m . При этом через солнечный иллюминатор условия наблюдения хуже. Видны лишь яркие светящиеся частицы, блеск которых превышает $-2^m,3$.

Максимальные дальности, на которых можно наблюдать в сумеречной зоне через боковой иллюминатор частицы диаметром 1 см и 0,2 мм, составят соответственно 600 м и 15 м [58].

Частицы размером до 1-2 см будут просматриваться до расстояния 600-1000 м.

4.5 Экспериментальные методы изучения пылевой компоненты: наземные методы и приборы для измерения характеристик ПК

В наземных условиях пыль относится к одному из трех классов аэродисперсных систем – пыли, дымы и туманы. Все три класса объединяются под общим названием аэрозоли [61].

Пыли состоят из твердых частиц, диспергированных в газообразной среде в результате механического измельчения твердых тел на порошкообразные материалы.

Пыль является полидисперсной системой, т.е. характеризуется широким спектром размеров (10^{-2} - 10^2 мкм). Форма и физико-химические свойства частиц пыли могут быть самыми разнообразными.

Приборы для измерения характеристик пыли объединены под общим названием пылемеры. С их помощью измеряются концентрация пыли, распределение по размерам, размер частиц.

В настоящем разделе рассмотрены две группы методов измерения параметров пыли: методы, основанные на предварительном ее осаждении, и методы без предварительного осаждения.

4.5.1 Методы и приборы измерения концентрации пыли, основанные на предварительном ее осаждении

4.5.1.1 Весовой метод и приборы

Весовой метод измерения концентрации пыли заключается в выделении из пыли газового потока частиц пыли и определения их массы путем взвешивания. Концентрацию пыли рассчитывают по формуле

$$C = m / (V_g \cdot t), \quad (4.5.1)$$

где m – масса пыли в аспирационном устройстве (устройстве отбора);

V_v – объемная скорость просасывания через устройство отбора;

t – время отбора пробы.

Измерение концентрации пыли весовым методом включает в себя следующие операции: отбор проб запыленного воздуха и измерение его объема, полное улавливание содержащейся в пробе пыли и взвешивание осажденной пыли.

С учетом погрешностей всех операций, осуществляемых при измерении концентрации весовым методом, средняя погрешность этого метода составляет $\pm 30\%$.

В весовых пылемерах для осаждения пыли широко используется метод фильтрации. На этом методе основан отечественный прибор АЭР-4 [64]. Погрешность измерения $\pm 20\%$.

Метод инерционного осаждения частиц пыли используется в счетчиках ударного действия – кониметрах. Принцип действия этих приборов основан на подсчете частиц, осевших на покровном стекле. Пылегазовый поток подают с большой скоростью через сопло, выходное отверстие которого имеет форму круга или плоской щели. Для фиксации частиц его смазывают липкой жидкостью (глицерином, раствором пихтового бальзама и т.п.). Кониметры снабжаются микроскопом для подсчета частиц сразу после отбора пробы.

Разработаны приборы с электростатическим осаждением пыли [65]. Электростатический пылемер содержит электрические весы, коромысло которых установлено на рубиновых камнях. На одном конце коромысла установлен емкостный или оптический датчик, на другом осадительный электрод. Внутри осадительного электрода, имеющего цилиндрическую форму, протянута проволока, служащая коронирующим электродом. На осадительный электрод подается положительное, а на коронирующий электрод – отрицательное напряжение от высоковольтного источника. Запыленный воздух пропускается сквозь осадительный электрод с помощью вентилятора. Частицы пыли в поле униполярной короны приобретают заряд и осаждаются на

осадительном электроде. Под действием массы осевшей пыли коромысло весов займет наклонное положение, которое фиксируется датчиком.

4.5.1.2 Радиоизотопный метод и приборы

Радиоизотопный метод основан на использовании свойства радиоактивного излучения поглощения частицами пыли. Непосредственно измерить поглощение радиоактивного излучения пылью, взвешенной в воздухе или движущейся в пылегазовом потоке, практически невозможно из-за малой концентрации пыли. Поэтому запыленный воздух предварительно фильтруют и затем определяют массу осевшей пыли по ослаблению радиоактивного излучения при прохождении его через пылевой осадок.

Концентрацию пыли рассчитывают по формуле (4.5.1), массу осевшей пыли определяют исходя из зависимости

$$I_{рад} = I_{o,рад} \cdot \exp(-\mu_m \cdot m), \quad (4.5.2)$$

где $I_{рад}$ и $I_{o,рад}$ – интенсивность радиоактивного излучения после прохождения его через пылевой осадок на фильтре и чистый фильтр;

μ_m – массовый коэффициент поглощения радиоактивного излучения, равный $a \cdot E^{-b}$;

E_{max} – максимальная энергия радиоактивного излучения;

a и b – константы ($a=0,017 \div 0,022$; $b=1,14 \div 1,50$).

Радиоизотопный метод реализован в приборе ИКП-534 [66]. Запыленный воздух за счет разряжения, создаваемого электродом, просасывается через ленточный фильтр из ткани ФПП-15. В качестве источника радиоактивного излучения используется изотоп Tl^{204} . β -лучи, пройдя через фильтр с пылевым осадком, регистрируются сцинтиляционным счетчиком. Регулятор расхода воздуха по мере увеличения пылевого осадка, а следовательно и сопротивления фильтра, обеспечивает постоянство расхода отсасываемого воздуха путем постепенного открывания вентиля. При предельном открытии вентиля

фиксатор освобождает фильтровальную ленту и включает лентопротяжный механизм. Время пробоотбора 6 мин. Прибор позволяет изменять концентрацию пыли в интервале 0-50 мг/м², погрешность измерения 12%.

4.5.1.3 Фотометрический метод

Этот метод измерения основан на предварительном осаждении частиц пыли на фильтре и определении оптической плотности.

Метод включает операции, аналогичные весовому методу, но вместо взвешивания проводит его фотометрирование. Оптическую плотность пылевого осадка можно определять путем измерения поглощения или рассеяния им света.

Измерение оптической плотности пылевого слоя по поглощению света основано на определении интенсивности света, прошедшего через слой:

$$I = I_0 \exp(-\varepsilon \cdot c \cdot l), \quad (4.5.3)$$

где I_0 – интенсивность начального светового потока;

c – концентрация пыли, накапливаемой на фильтре;

ε – показатель поглощения света, приходящийся на единицу концентрации пыли;

l – толщина концентрации слоя пыли.

Оптическая плотность пылевого слоя D равна:

$$D = \lg(I_0 / I) = 0,434 \varepsilon \cdot c \cdot l. \quad (4.5.4)$$

Поскольку при осаждении пыли на фильтр изменяется как концентрация ее C , так и толщина слоя l , то при измерении оптической плотности пылевого слоя можно определить только суммарную величину cl , являющуюся поверхностной концентрацией $S_{пов}$ пыли на фильтре:

$$C_{нов} = c \cdot l,$$

отсюда

$$D = 0,434 \varepsilon \cdot C_{нов},$$

т.е. между оптической плотностью образовавшегося пылевого слоя и поверхностной концентрацией пыли существует линейная зависимость. Измерив D и зная показатель поглощения ε , можно определить $C_{пов}$:

$$C_{нов} = D / 0,434 \varepsilon.$$

Основной недостаток фотометрического метода связан с тем, что прозрачность пылевого осадка существенно зависит от цвета частиц и их оптической плотности.

Примером реализации рассмотренного выше метода служит пылемер ФЭКП-3. В данном приборе измеряется интенсивность света, рассеянного осевшей пылью.

Прибор состоит из поршневого насоса с пружинным приводом, фильтропротяжного механизма и фотометра.

Фотометр состоит из миниатюрной лампы накаливания типа МН-1 (1В, 0,075А) и двух фотоприемников, расположенных так, чтобы против одного находился чистый фильтр, а против другого фильтр с осевшей пылью. Интервал измеряемых концентраций 0-4000 мг/м³, погрешность $\pm 24\%$.

4.5.1.4 Люминесцентный метод

Для определения концентрации пыли в атмосфере воздуха используют осаждение ее на фильтр, обработанный определенными флуоресцирующими растворами, и последующее измерение интенсивности флуоресценции. Для исключения влияния изменения флуоресцентных свойств фильтра измеряется интенсивность флуоресценции фильтра до и после осаждения на нем пылевых осадков. Получена линейная зависимость между поверхностной концентрацией пыли $C_{пов}$ и отношением интенсивностей концентрации чистого фильтра и фильтра с пылевым осадком.

Осевшая пыль вызывает тушение флуоресценции, причем имеет место линейная зависимость между тушением флуоресценции и поверхностной концентрацией пыли, которая аппроксимируется следующим уравнением:

$$I_{офл} / I_{фл} = 0,948 + 0,059C_{нов}.$$

Достоинством люминесцентного метода является высокая чувствительность и широкий интервал измеряемых концентраций (порядка 10^9).

4.5.1.5 Пьезоэлектрический метод

Одним из перспективных методов измерения концентрации пыли является пьезоэлектрический метод.

Возможны два варианта использования этого метода: измерение изменений частоты колебаний кристалла при осаждении на его поверхности пыли и счет электрических импульсов, возникающих при соударении частиц пыли с пьезокристаллами.

В первом варианте пьезокристалл включен в контур резонатора, настроенного на определенную частоту f . За измерительным кристаллом устанавливают компенсационный кристалл, изолированный от пылегазового потока. Этот кристалл включен в контур резонатора, частота которого f_k отлична от f .

Выходные колебания обоих резонаторов подаются на блок сравнения, который выделяет разностную частоту $\Delta f = f - f_k$.

При осаждении частиц пыли на измерительный кристалл частота колебаний последнего уменьшается на величину Δf_1 , при этом изменяется разность:

$$\Delta f_2 = f - f_k - \Delta f_1 = \Delta f - \Delta f_1.$$

Установлено, что при малых амплитудах колебаний [68]

$$\Delta f_1 = A \cdot m,$$

где A – коэффициент пропорциональности.

Таким образом, изменение частоты измерительного кристалла прямо пропорционально массе m осевшей на нем пыли.

Существенным преимуществом пьезоэлектрического метода является то, что он позволяет измерять массовую концентрацию пыли.

Пьезоэлектрический метод реализован в кварцевом измерителе запыленности типа КДМ-1. В этом приборе применяется принудительное осаждение пыли при помощи электростатического поля. Интервал измеряемых концентраций прибора 0-100 мг/м³.

4.5.2 Методы и приборы измерения концентрации пыли без предварительного ее осаждения

4.5.2.1 Оптические методы

Прежде чем рассматривать оптические методы, остановимся на некоторых основных характеристиках взаимодействия частиц с электромагнитными излучениями.

Связь характеристик излучения, изменившихся в результате взаимодействия со сферической частицей, с параметрами этой частицы устанавливаются теорией Ми [69] в качестве безразмерных параметров частицы. В теории Ми используется параметр дифракции

$$\rho = 2\pi r / \lambda,$$

где r – радиус частицы;

λ – длина волны используемого электромагнитного излучения, а также комплексный коэффициент преломления материала частицы m .

Общее ослабление излучения частицей складывается из рассеяния и поглощения.

Ниже представлены основные характеристики взаимодействия излучения с частицами:

1. Коэффициент или сечение ослабления – отношение количества энергии, рассеянной и поглощенной частицей, к количеству энергии, падающей на ее поперечное сечение. Коэффициент имеет размерность площади. Аналогично определяется коэффициент (сечение) рассеяния $K(\rho, m)$.

2. Безразмерный фактор эффективности ослабления

$$K_0(\rho, m) = K(\rho, m) / (\pi \cdot r^2).$$

Аналогично определяется фактор эффективности рассеяния:

$$K_p(\rho, m) = K(\rho, m) / (\pi \cdot r^2).$$

3. Пространственное распределение рассеянного частицей света, характеризуемое индикатрисой рассеяния $J(\Theta)$ как поток, рассеянный в единичном телесном угле в данном направлении, отнесенный к полному потоку излучения, рассеянного частицей:

$$f(\Theta) = I_{pac}(\Theta) / \int_{4\rho} I_{pac}(\Theta) d\omega. \quad (4.5.5)$$

4. Степень поляризации рассеянного света, определяемая как

$$P = (I_s - I_p) / (I_s + I_p),$$

где I_s – интенсивность излучения, поляризованного перпендикулярно плоскости рассеяния:

I_p – интенсивность ортогональной составляющей.

Деполяризация Δ определяется:

$$\Delta = I_s / I_p.$$

Для аэрозолей, состоящих из полидисперсных частиц, имеющих распределение по размерам $f(r)$, поглощение и рассеяние характеризуются усредненным по функции распределения

(или полидисперсным) коэффициентом ослабления (рассеяния), полидисперсной индикатрисой и концентрацией частиц. Для достаточно больших частиц, имеющих параметр дифракции $\rho > 30$, фактор эффективности рассеяния практически постоянен и равен двум, то есть рассеяние не зависит от длины волны.

В этом случае взаимодействие излучения и частицы рассматривается с позиций геометрической оптики.

Для частиц, имеющих значение параметра дифракции $\rho \ll 1$, размеры частиц малы по сравнению с длиной волны λ и рассеяние света сферической частицей радиусом r из диэлектрика для неполяризованного света описывается уравнением Рэлея:

$$I = \frac{8\pi^4 r^6}{R^2 \cdot \lambda^4} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right) \cdot (1 + \cos^2 \Theta) I \lambda. \quad (4.5.6)$$

В большинстве случаев частицы пыли являются сравнительно крупными выпуклыми частицами, имеющими параметр $\rho > 1$, со случайной ориентацией в пространстве.

В монографии приводится полученное упрощенное уравнение, позволяющее определить интенсивность света, рассеянного такой частицей под углом рассеяния Θ :

$$I = I_0 \cdot \bar{S} \cdot f(\Theta) / (4\pi \cdot r), \quad (4.5.7)$$

где \bar{S} – среднегеометрическое сечение частицы произвольной формы.

Светорассеивающие свойства системы таких частиц аналогичны светорассеивающим свойствам одной частицы, если частицы рассматривать независимыми частицами. Световые волны, рассеянные различными частицами, строго когерентны с облучающей эти частицы световой волной, но некогерентны между собой.

При определении суммарной интенсивности, рассеянной системой таких независимых частиц, интенсивности света, рас-

сеянного отдельными частицами, должны складываться без учета фазы, то есть фазовыми эффектами можно пренебречь.

Чтобы частицы были независимыми, необходимо соблюдение следующих условий:

- расстояние между частицами должно быть гораздо больше длины волны падающего света;
- расстояние между частицами должно быть больше утроенного радиуса частицы.

Учитывая условия аддитивности и уравнения (4.5.7), интенсивность света, рассеянного под углом Θ объемом $V_{рас}$, содержащим в единице объема N крупных независимых частиц, может быть выражена следующим образом:

$$I(\Theta) = I_0 \cdot \bar{S} \cdot f(\Theta) \cdot N \cdot V_{рас} / (4\pi \cdot R). \quad (4.5.8)$$

Уравнение (4.5.8) применимо только для однократного рассеяния, когда интенсивность начального светового потока одинакова для всех частиц. При многократном рассеянии света интенсивность уже не будет пропорциональна числу рассеивающих частиц из-за ослабления потока в результате взаимодействия с частицами.

4.5.2.2 Абсорбционный метод и приборы

Метод основан на явлении поглощения света при прохождении его через пылегазовую среду. Световой поток, проходя внутри измерительной камеры через пылегазовую среду, ослабляется и фиксируется фотоприемником.

Абсорбционный метод используется в одноканальном оптическом пылемере НИИМ-2.

4.5.2.3 Метод и приборы интегрального светорассеяния

Метод интегрального светорассеяния дает возможность определять массовую концентрацию частиц пыли по измерению суммарной интенсивности авторассеяния.

В приборах, реализующих этот метод, измеряется интенсивность света, рассеянного пылью, находящейся в закрытой пылевой камере. Пробу отбирают в камеру, закрывают ее и проводят измерения. Интенсивность рассеянного света определяется с помощью визуального устройства, включающего окуляр, измерительные и сравнительные поля. Измерительное поле освещается светом, рассеянным находящейся в камере пылью, а поле сравнения – светом от источника после прохождения им устройства ослабления света. Это устройство служит для ручной регулировки освещенности поля сравнения (перед измерением концентрации пыли) до полного уравнивания измерительного и сравнительного полей.

К приборам, основанным на измерении интегрального светорассеяния системой частицы, относятся нефелометры ФЭН-58 и ФЭН-90. Интервал измеряемой счетной концентрации от 1 до 10^8 чист./с². Размеры регистрируемых частиц 0,04–0,1 мкм.

4.5.2.4 Приборы и методы счета частиц по интенсивности рассеянного света

Для измерения малых концентраций пыли используются счетчики частиц, основанные на измерении интенсивности рассеянного частицей света. При этом в момент измерения в освещаемом объеме счетчика находится только одна частица.

Импульсы рассеянного света регистрируются амплитудным анализатором импульсов, а затем суммируются по классам. Таким образом, определяется не только счетная концентрация пыли, но и ее дисперсный состав.

Параметры счетчика частиц зависят от угла рассеяния, под которым регистрируется рассеянный свет, и рабочего объема, а также от метода формирования аэрозольного потока.

Рабочим объемом счетчика называется некий ограниченный объем, при попадании частицы в который на выходе счетчика возникает электрический сигнал.

Обычно в счетчиках используют углы рассеяния равные 90° и 0° (счетчики с 90° геометрией и счетчики с 0° геометрией). У

счетчиков с 0° геометрией направление рассеяния света близко к распространению прямого светового потока.

Оптическая схема счетчиков с 90° геометрией дана на рис.4.4.

Оптическая схема счетчиков с 0° геометрией изображена на рис.4.5.

При наличии в измерительном объеме нескольких частиц результат измерения счетной концентрации, выдаваемой счетчиком, отличается от действительной счетной концентрации в исследуемом объеме. Поэтому при конструировании счетчика стремятся к уменьшению рабочего объема счетчика.

К датчикам с 90° геометрией относится датчик ВДК-4. Основные характеристики: интервал измеряемых счетных концентраций $1-10^7$ част./см³; размеры регистрируемых частиц 0,3-2мкм; погрешность измерения в интервале $10^2 \div 10^6$ част./см³ составляет $2 \pm 20\%$.

К датчикам с 0° геометрией относится датчик типа ФИЧА-К- 0° . Максимальная счетная концентрация, измеряемая счетчиком $1 \cdot 10^4$ част./см³, минимальный определяемый размер 4 мкм, погрешность $8 \pm 20\%$.

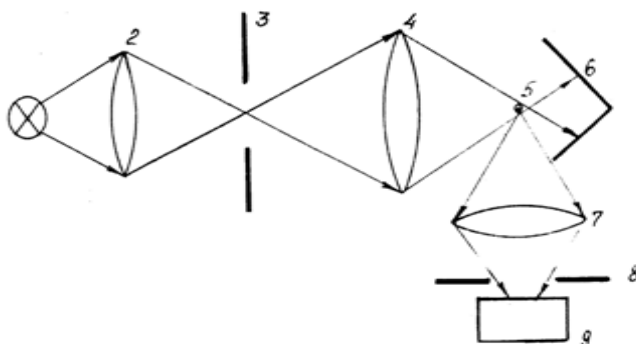


Рис. 4.4. Оптическая схема счетчиков с 90° геометрией:
1 – источник света; 2 – конденсатор; 3 – щель; 4 – объектив;
5 – канал для прохождения пылегазовой струи; 6 – световая ловушка;
7 – система линз; 8 – диафрагма; 9 – фотоприемник

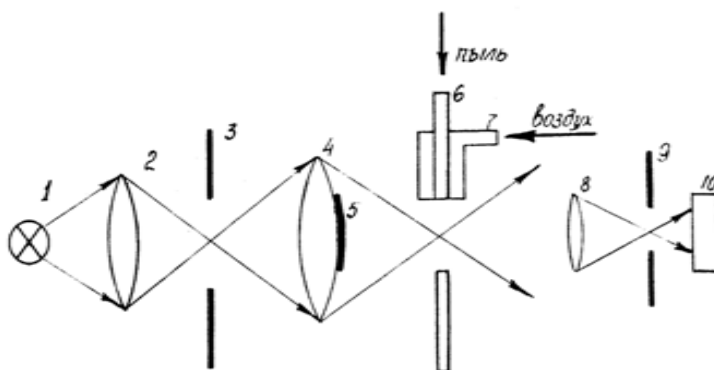


Рис. 4.5. Оптическая схема счетчиков с 0° геометрией:
 1 – источник света; 2 – конденсатор; 3, 9 – диафрагмы;
 4 – объектив; 5 – гаситель прямого пучка света;
 6 – канал для прохождения пылегазовой струи; 7 – канал
 для подачи чистого воздуха; 8 – линза; 10 – фотоприемник

4.5.2.5 Голографический метод

Голографический метод основан на получении голограммы. Он представляет собой наложение дифракционной картины частицы дальнего поля и поля источника счета. Метод позволяет получить информацию о счетной концентрации частиц, их размере и положении в пространстве.

Измерительная камера с частицами пыли освещается импульсом рубинового лазера. С помощью линзы исследуемый поток частиц записывается на голограмме в увеличенном виде.

Для восстановления изображения по голограммам используется гелий-неоновый лазер с непрерывным излучением. Восстановление изображения проецируется на передающую телевизионную трубку.

4.5.2.6 Индукционный метод и приборы

В основу индукционного метода положено определение индуцированного на электроде измерительной камеры заряда, воз-

никающего при движении через камеру заряженных пылевых частиц. Величина заряда является мерой массовой концентрации пыли. Суммарный заряд ΣQ , наведенный на индукционном электроде при введении в измерительную камеру N частиц, определяется по формуле

$$\Sigma Q = -\sum_{i=1}^N q_i \cdot \Phi_0(x_i, y_i, z_i),$$

где q_i и Φ_0 – величины, характеризующие i -ю частицу. Методу присущи погрешности, так как распределение зарядов на частицах пыли зависит от многих факторов и с течением времени может меняться в широких пределах. Указанные погрешности значительно снижаются при предварительной зарядке частиц.

На индукционном методе разработан прибор ЭПЦ, технические характеристики прибора: интервал измеряемых концентраций – $0-10 \text{ мг/см}^3$, погрешность $\pm 15\%$.

4.5.2.7 Контактно-электрический метод и приборы

Этот метод основан на способности пылевых частиц электризоваться при соприкосновении с твердым материалом. Для зарядки частиц используются следующие виды электризации:

- статико-электрические (электризация при разделении твердого тела на частицы);
- баллоэлектрические (электризация при относительном перемещении соприкасающихся твердых тел).

На контактно-электрическом методе основана работа пылемеров серии ЭК. В пылемере ЭКТМ-1м электризатор представляет собой диск, выполненный из эбонита, внутри которого высверлено отверстие диаметром $0,2 \text{ мм}$. Токосъемным электродом служит проволока диаметром $0,15 \text{ мм}$, натянутая перпендикулярно оси канала на расстоянии $0,2 \text{ мм}$ от места вылета частиц пыли.

4.5.2.8 Емкостный метод и приборы

Этот метод основан на измерении изменения емкости конденсатора при введении частиц пыли между его пластинами. Если в колебательный контур включить такой конденсатор, то по изменению частот можно судить о концентрации пыли.

Емкостный метод реализован в измерителе запыленности ТДМ-2. Интервал измеряемых концентраций 0–10 и 0–100мг/см³, погрешность ±12%

4.5.3 Анализ существующих наземных методов измерения параметров ПК с точки зрения их применимости для проведения натурных экспериментов

4.5.3.1 Предварительные замечания

Основными отправными пунктами при анализе существующих методов измерения характеристик пыли должны быть вид и объем информации, получаемой от комплекса бортовой аппаратуры, и требования, предъявляемые к НА.

Объем и вид информации, получаемой от комплекса бортовой НА, определяют направления ее использования. Можно выделить три таких направления (взаимно перекрываемых):

1. Уточнение и изменение существующих эксплуатационных требований, предъявляемых к бортовой аппаратуре КА.
2. Выявление возможных явлений, которые могут привести к сбою или отказу как отдельных узлов БА, так и КА в целом.
3. Выработка рекомендаций для организационных методов борьбы с повреждающим воздействием ПК (изменение технологии изготовления, начало работы БА и т.д.), разработка способов и методов активного противодействия (например, электростатическое осаждение и т.д.).

Информация для первого направления должна содержать следующие данные:

1. Условия появления частиц ПК в некотором объеме, окружающем КА (область оценки).

2. Средняя (за время активного существования) счетная концентрация пылевых частиц в области оценки.

3. Распределение частиц по размерам.

По предварительным данным [60] наиболее сильно повреждающее воздействие ПК проявляется при попадании в поле зрения оптической БА (например, АВУ) одной или группы светящихся частиц пыли. При этом анализирующий блок АВУ может ошибочно распознать одну из частиц как звезду ориентации и продолжать выдачу команд управления исполнительным органам двигательной установки до момента выхода из поля зрения прибора, что может привести к срыву выполнения основной задачи изделия. Следовательно, основной информацией для второго направления могут быть:

1. Оптические характеристики частиц, могущих привести к сбою БА.

2. Кинетические характеристики частиц – скорость и направление перемещения.

Кроме перечисленных для первого и второго направления данных (при условии достаточной выборки) может быть оценена вероятность появления светящейся частицы в поле зрения оптической БА в зависимости от условий полета, функционирования ДУ, работы пиротехнических устройств разделения и фиксации.

4.5.4 Экспериментальные способы изучения параметров ПК

4.5.4.1 Требования, предъявляемые к бортовой аппаратуре по изучению параметров ПК

Требования, предъявляемые к бортовой НА по изучению ПК, можно разделить на общие и специальные. Общие требования к конструкции бортовой НА изложены в соответствующей нормативно-технической документации.

Специальные требования:

1. Возможность проведения измерений в большом объеме – ед.м³. Это требование связано с неравномерностью концентрации в области оценки и с отсутствием априорных данных по условиям появления частиц ПК на данном типе КА.

2. Возможность вычисления счетной концентрации в объеме измерения.

3. Возможность получения оптических характеристик отдельных частиц.

4. Возможность оценки и изменения кинетических характеристик отдельных частиц.

5. Возможность получения визуальной информации.

4.5.4.2 Возможные варианты реализации комплекса НА для изучения характеристик ПК

Прежде чем приступить к рассмотрению вариантов реализации комплекса НА, систематизируем некоторые характеристики частиц ПК.

По предварительным данным частицы ПК имеют следующие характеристики:

1. Размер – 0,5-15 мм (от субмикронных до десятков мм).

2. Яркость 2^m - $(-4)^m$.

3. Скорость перемещения – от единиц мм до десятков см в сек.

4. Форма частиц – как сферическая, так и неопределенная.

По предварительным проработкам литературных источников [60 ÷ 75] можно сделать вывод, что разработка и реализация полностью автоматизированного бортового комплекса НА с целью его установки на невозвращаемых КА, удовлетворяющего достаточно жестким общим требованиям к бортовой НА и реализующего в полном объеме специальные требования, достаточно сложны.

Оптимальным является путь разработки малогабаритного бортового комплекса НА по изучению ПК СВА, с помощью которого проводятся получение и запоминание научной информа-

ции с последующей доставкой на Землю и детальной обработкой на наземном комплексе НА.

Рассмотрим несколько вариантов таких комплексов:

Вариант 1

Установка в СА манукулярной фото- или киноаппаратуры и проведения съемок ПК в условиях естественной освещенности. В момент съемок угол визирования должен составлять 90° с направлением на Солнце. Угол возвышения Солнца $10-15^\circ$.

Недостатки:

1. Необходимость доработки корпуса СА.
2. Трудности оценки по двумерному изображению дальности до частиц и их пространственное расположение.
3. Трудности при оценке оптических характеристик.
4. Трудности при оценке кинетических характеристик.

Вариант 2

То же, что и вариант 1, но предусматривает применение стереоскопической фото- и киноаппаратуры.

Недостатки:

1. Доработка корпуса СА.
2. Трудности при оценке оптических характеристик.

Вариант 3

Установка вне гермоотсеков стереоскопической фото- или киноаппаратуры с применением искусственной подсветки (рис. 4.6).

Недостатки:

1. Сложности с доставкой информации.

Вариант предусматривает установку стереотелевизионного измерительного устройства. В этом случае две передающие телевизионные камеры (черно-белого или цветного изображения), образующие стереопару, передают видеосигнал по кабелю к видеоманитофону, который записывает на пленку визуальную информацию. Видеоманитофон по окончании срока активного существования доставляется на Землю. Детальная обработка за-

писанной информации производится на наземном измерительном комплексе.

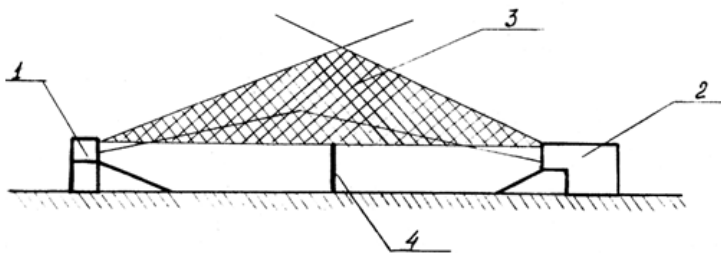


Рис. 4.6. Стереоскопическая фото- и киноаппаратура:
1 – источник света; 2 – фотокиноаппаратура; 3 – зона обзора;
4 – гаситель прямого пучка света

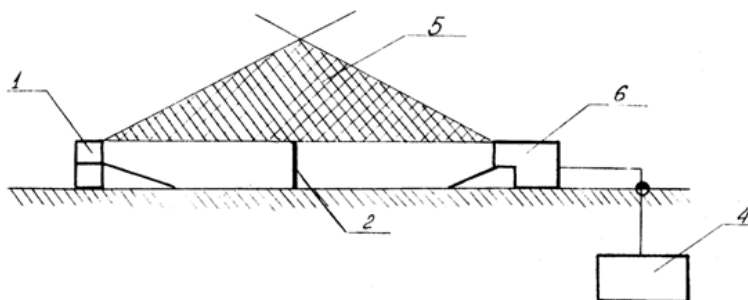


Рис. 4.7. Схема стереотелевизионного устройства:
1 – источник света; 2 – гаситель прямого пучка света;
3 – передающие камеры; 4 – видеомагнитофон; 5 – зона обзора

Схема размещения представлена на рис. 4.7.

Упрощенная функциональная схема комплекса НА представлена на рис. 4.8.

Измерительное стереотелевизионное устройство наряду с изображением рассматриваемых объектов [74] воспроизводит специальное изображение стереоскопически воспринимаемой шкалы. Такие шкалы могут быть сформированы электронным

образом. При просматривании объекта в воспроизводящем устройстве оператор может совместить визир с любой деталью стереоскопического изображения и получить цифровую информацию о глубинном размере.

Комплекс наземной НА работает следующим образом:

Изображение двух ракурсов объекта измерения воспринимают две передающие видеокамеры. Видеомагнитофон производит запись двух видеосигналов от камер. Сигнал с воспроизводящего устройства через видеоусилитель подается на приемные электронно-лучевые трубки, на экранах которых оператор рассматривает изображение через пространственный селектор стереопары.

Строчные синхронизирующие импульсы с устройства выделения подаются на устройство формирования электронного визира и запускают два ждущих мультивибратора. Задний фронт импульсов, генерируемых мультивибратором, служит для запуска формирователей строб-импульсов для правого и левого изображений стереопары. Формируемые импульсы при раздельном их рассмотрении воспринимаются как вертикально направленные прямые линии на экранах приемных кинескопов. Стереоскопическое рассматривание линий, получаемых с помощью формирователей, воспринимается оператором как вертикальный визир в различных точках стереоскопически воспринимаемого трехмерного пространства. Регулируя длительность ждущих мультивибраторов, оператор имеет возможность совместить визир с любой деталью стереоскопически воспринимаемого изображения. Устройство формирования визира соединено с блоком измерения глубинных размеров. Полученный в блоке измерения глубинных размеров результат индицируется на цифровом табло.

В устройстве ведения сигнала частицы происходит выделение импульса, соответствующего частице. По его амплитуде, измеренной в блоке измерения амплитуды, можно судить о яркостных характеристиках.

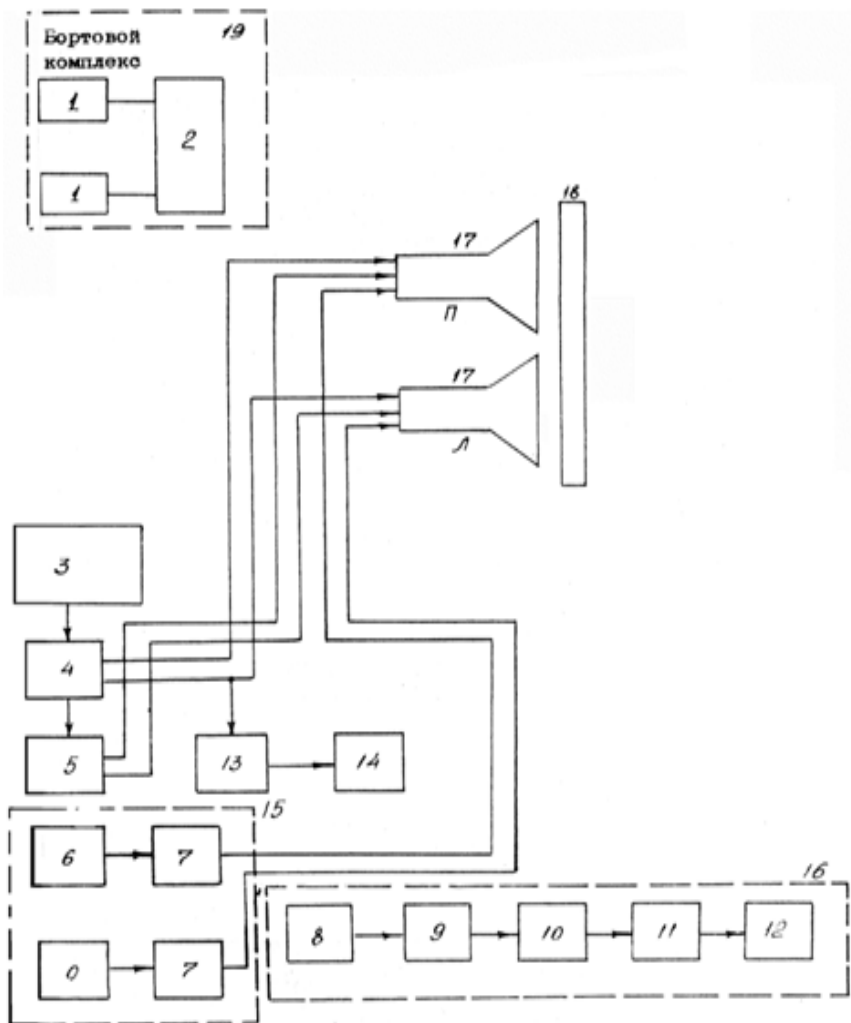


Рис. 4.8. Упрощенная функциональная схема комплекса НА

Достоинства варианта:

1. Оператор может оценить относительное расположение отдельных объектов в пространстве.

2. Точность измерения глубинных размеров в устройствах с электронно-формируемым визиром достигает 1%.

3. Точность оценки абсолютной удаленности наблюдаемых деталей в 3 раза выше по сравнению с восприятием двумерных изображений.

4. Выше наглядность воспринимаемых изображений.

5. Возможность многократного воспроизведения полученной информации.

6. Возможность проведения фотодокументирования.

Вариант 4

Недостатки:

1. Фотометр не дает изображения источников излучения. В связи с этим анализ кинетических характеристик может проводиться только косвенно, с использованием довольно громоздкого математического аппарата.

Сопоставляя варианты, можно заключить, что с точки зрения информативности оптимальной является установка стереотелевизионного измерительного устройства, сопряженного с фотометром.

В этой системе поле зрения фотометра устанавливается и жестко фиксируется относительно телевизионных камер. Установка такого типа имеет ряд преимуществ перед фотометром и телевизионной системой и, по существу, дает возможность значительно повышать качество измерений. Соединение телевизионной системы с фотометром устраняет недостатки каждого прибора и создает возможность с хорошей точностью восстановить динамику пылевой компоненты.

Вышерассмотренные варианты и их комбинации, естественно, требуют дальнейшей доработки в части детального изучения возможностей как реализационного характера, так и с целью уточнения требований, предъявляемых к техническим характеристикам предлагаемых устройств.

Состав упрощенной функциональной схемы комплекса НА (рис. 4.8):

1 – две передающие камеры;

2 – видеоманитофон;

3 – воспроизводящее устройство;

- 4 – видеоусилитель;
- 5 – селектор синхронизирующих (строчных и кадровых) импульсов;
- 6 – ждущий мультивибратор;
- 7 – формирователь строб-импульсов;
- 8 – вычитающее устройство;
- 9 – ключевая схема;
- 10 – устройство измерения длительности импульса;
- 11 – арифметическое устройство;
- 12 – устройство индикации;
- 13 – устройство выделения сигнала частицы;
- 14 – блок измерения импульса частицы;
- 15 – устройство стереоскопически воспринимаемого визира;
- 16 – блок измерения глубинных размеров;
- 17 – приемные электронно-лучевые трубки;
- 18 – устройство пространственной селекции стереопары.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена визуальная оценка ПК, при этом оценены:

- яркость частиц ПК – $0-2^{-m}$ звездной величины;
- размеры – от долей мм до 2-4 мм;
- количество частиц в зоне наблюдения – до 10^3 ;
- дальность наблюдения для частицы радиусом:
 - 0,5 см – 600 м;
 - 0,02 см – 15 м.

2. На основании экспериментальных и расчетных данных показано:

- сила света от пылевой частицы размером 0,1 мм – $3 \cdot 10^{-4}$ кд;
- скорости частиц ПК относительно КА в зависимости от высоты полета могут достигать величин:
 - 10 м/с для высоты 200 км;
 - 10 см/с для высоты 400 км.

3. Анализ наземных методов измерения параметров ПК показал принципиальную невозможность применения этих методов для натурного экспериментального исследования параметров ПК.

4. Рассмотрено несколько предполагаемых вариантов комплексов НА для измерения параметров ПК и приведен их сравнительный анализ. Показано, что оптимальной с точки зрения информативности является установка стереотелевизионного измерительного устройства, сопряженного с фотометром.

5 МОДЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЫЛЕВОЙ КОМПОНЕНТЫ СВА КА

5.1 Движение пылевых частиц в окрестности космического аппарата

Частицы пыли, выбрасываемые вращающимся на орбите космическим кораблем, могут возвращаться к нему и взаимодействовать с его оборудованием [104], но могут оставаться в составе СВА ЛА и мешать работе этого оборудования. ЛА может иметь круговую, эллиптическую, восходящую или любую другую специально описанную орбиту. Наиболее вероятной орбитой КА является эллиптическая, так как большинство аппаратов движется именно по ней. Поэтому рассмотрим движение КА только по эллиптической орбите. В работе [105] рассмотрены вопросы о распределении частиц вокруг КА.

В предположении того, что частицы независимы, в системе координат, связанной с КА (рис. 5.1), движение частицы описывается системой дифференциальных уравнений (учитывая аэродинамическое торможение):

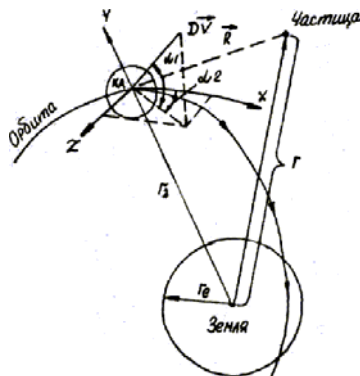


Рис. 5.1. Система координат, связанная с объектом

$$\begin{cases} \ddot{x} - (\dot{y} - r_s)\ddot{\theta} + 2(\dot{y} + r_s)\dot{\theta} - x\dot{\theta}^2 + q\frac{x}{2} + D(r_s\dot{\theta} + x)^2 = 0 \\ \ddot{y} - x\ddot{\theta} - 2\dot{x}\dot{\theta} + r_s - (y + r_s)\dot{\theta}^2 + q\frac{y}{2} + D(\dot{r}_s + \dot{y})^2 = 0 \\ \ddot{z} + q\frac{z}{x} + Dz^2 = 0, \end{cases} \quad (5.1.1)$$

где x, y, z – координаты частицы относительно ЛА;

r_s – расстояние от центра Земли до ЛА;

θ – угловое смещение;

$$D = \frac{3}{8} \frac{C_2}{r_1} \frac{\rho_a}{\rho_2};$$

$$z = \sqrt{X^2 + (y + r_s)^2 + Z^2};$$

$$q = q_e \frac{r_e^2}{r^2};$$

C_2 – коэффициент торможения частицы;

r_2 – радиус частицы;

ρ_2 – плотность вещества частицы;

ρ_a – плотность атмосферы вокруг ЛА;

q – гравитационное ускорение на высоте от центра Земли;

q_e – ускорение свободного падения у поверхности Земли;

r_t – радиус Земли.

Решение уравнений (5.1.1) дает относительное положение частицы $R(x, y, z)$ по отношению к КА. Положение и движение КА описываются величинами r_s, θ и другими производными.

Решаются эти уравнения численно с применением модифицированного метода Рунге-Кутты. В окрестности некоторой точки орбиты r_s и $\theta(x_0, y_0, z_0)$ эти уравнения линеаризуются и могут давать точные решения для коротких промежутков времени:

$$\begin{aligned}\ddot{x} + 2\dot{y}\dot{\theta} &= 0, \\ \ddot{y} - 2x\dot{\theta} - 3y\dot{\theta}^2 &= 0, \\ \ddot{z} + \dot{\theta}^2 z &= 0.\end{aligned}\tag{5.1.2}$$

Решение системы дифференциальных уравнений дается в виде

$$x = -\left(4\frac{x_0}{\theta} + 6y\right)\cos t\dot{\theta} + 2\frac{y_0}{\theta}\cos t\dot{\theta} + (6y_0 + 3\frac{x_0}{\theta})t\dot{\theta} - 2\frac{y_0}{\theta} + x_0,\tag{5.1.3}$$

$$y = -\left(2\frac{x_0}{\theta} + 3y_0\right)\cos t\dot{\theta} + 2\frac{y_0}{\theta}\sin t\dot{\theta} + 4y_0 + 2\frac{x_0}{\theta},$$

$$z = z_0 \cos t\dot{\theta} + \frac{z_0}{\theta} \sin t\dot{\theta}.$$

Эллиптическая орбита вокруг Земли показана на рис. 5.2.

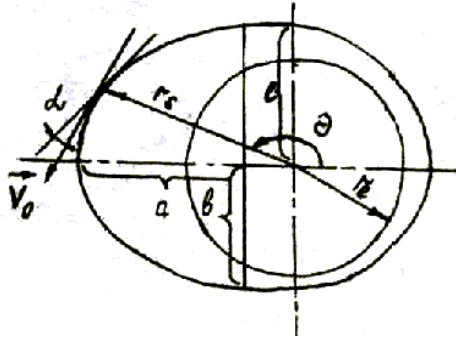


Рис. 5.2. Параметры эллиптической орбиты

Когда орбитальные параметры для момента времени $t=t_0$ задаются, то остальные величины для подстановки в уравнения (5.1.2) или (5.1.3) определяются выражениями:

$$\dot{r}_s = V_0 \sin \alpha = \frac{r_s^2 \theta_e \sin \theta}{e};\tag{5.1.4}$$

$$\theta = \frac{V_0}{r_s} \cos \alpha = \frac{r_0 V_0 \cos \alpha}{r_s}; \quad (5.1.5)$$

$$\ddot{r}_s = \frac{r_s^2 \dot{\theta}^2 e \cos \theta}{e}; \quad (5.1.6)$$

$$\ddot{\theta} = -2 \frac{\dot{r}_s \dot{\theta}}{r_s}, \quad (5.1.7)$$

где $e = \left[\left(\frac{r_s V_0^2}{k} - 1 \right)^2 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \right]^{\frac{1}{2}}$ – эксцентриситет орбиты, $e = r_s (1 + e \cos \alpha)$ – параметр орбиты.

Величины непрерывно вычисляются и подставляются в системы (5.1.1) или (5.1.3) для нахождения решения.

Скорость выброса частиц с КА обозначена через ее начальное направление в пространстве и определяется углами:

α_1 – местный угол восхождения,

α_2 – угол локального АЗУ.

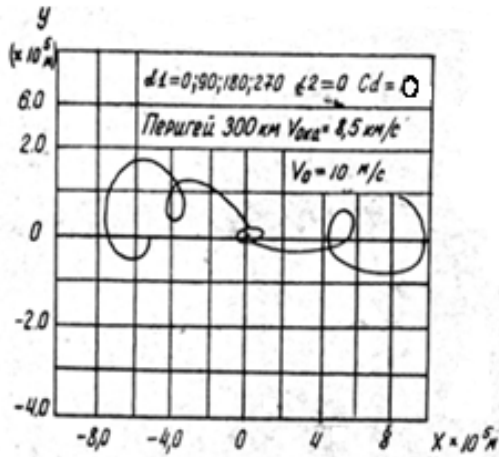
Составляющие по координатам определяются по формулам:

$$V_{0x} = DV \cos \alpha_1 \cos \alpha_2, \quad (5.1.8)$$

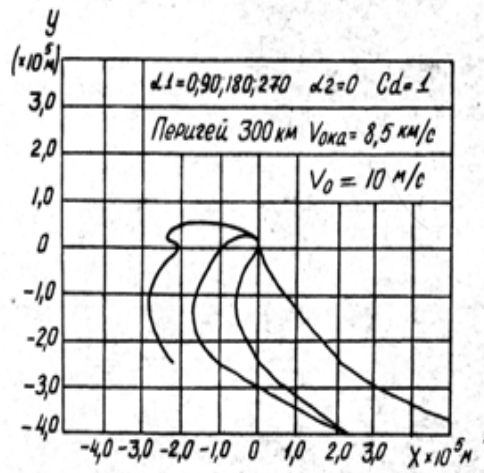
$$V_{0y} = DV \sin \alpha_1,$$

$$V_{0z} = DV \cos \alpha_1 \sin \alpha_2.$$

Траектории частицы, выброшенной с КА под различными углами на эллиптической орбите, показаны на рис. (5.2). Скорость движения ЛА $V_{\text{ла}}=8,5$ м/с при $r_{z \text{ max}}=300$ км. Скорость выброса частиц V_0 . На рис. 5.3, а аэродинамическое торможение отсутствует, на рис. 5.3, б коэффициент аэродинамического сопротивления $C_d=1$.



а)



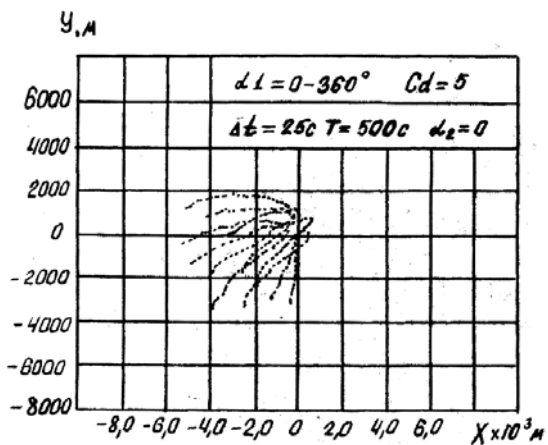
б)

Рис. 5.3. Траектория частицы:
 а – аэродинамическое торможение отсутствует;
 б – коэффициент аэродинамического сопротивления $Cd=1$.

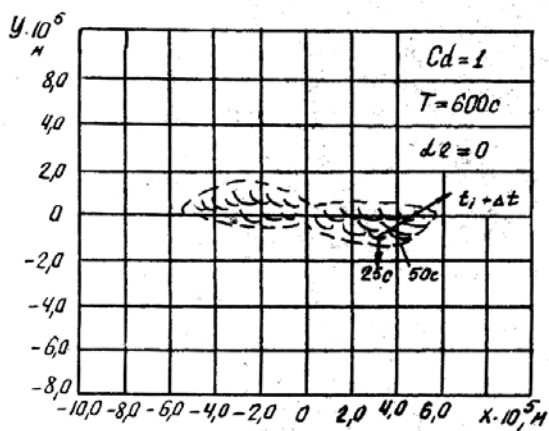
5.2 Траектория частицы при движении по эллиптической орбите

Временной интервал при этом составляет около 0,1 орбитального периода. При отсутствии сопротивления атмосферы решения уравнений (5.1.1) и (5.1.2) совпадают. В этом случае частица длительное время находится в составе СЗА. При торможении частицы очень быстро удаляются от КА и больше не возвращаются к нему. Можно показать, что при тех же условиях в интервале углов α_1 от 290° до 295° возможно возвращение частиц в СЗА КА, возвращение также возможно в интервале углов α_1 от 342° до 345° . После прохождения частиц через СЗА ЛА за счет аэродинамического сопротивления они больше никогда не возвращаются. На рис. (5.4, а) показана динамика облака из 12 частиц, выброшенных со скоростью $V_0=4 \text{ мс}^{-1}$ в течение 600с.

Положение частиц фиксируется через 25с. В начальный период времени частицы движутся по «течению» аэродинамического сопротивления, затем спускаются на более низкую орбиту и навсегда покидают СВА. В случае геосинхронной орбиты, где торможение отсутствует, частицы расползаются в полосу впереди и сзади КА, далеко не отходя от корабля (рис. 5.4, б). В этом случае считается, что частицы покинули КА в один и тот же момент времени. Распределение облака частиц можно показать аналитически, если систему уравнений решить совместно с уравнениями, описывающими генерацию частиц.



a)



б)

Рис. 5.4. Динамика облака из частиц:
 а – аэродинамическое торможение отсутствует;
 б – аэродинамическое торможение присутствует

5.3 Траектории движения частицы на эллиптической и геосинхронной орбитах

Таким образом, частицы пыли, покинувшие ЛА, переходят на свои собственные орбиты, причем частица движется вверх и отстает от КА, если имеется V_{ox} компонента в направлении X (то есть орбита с большей энергией), если же существует V_{oy} компонента, то энергия соответствующей орбиты меньше энергии орбиты КА и частица движется ниже и впереди КА. Кроме того, орбиты частицы быстро теряют энергию и происходит сокращение орбиты. Частицы, которые движутся по более низким орбитам, уже больше никогда не встретятся с кораблем. Если более высокая орбита частицы сокращается достаточно медленно, то возможен повторный проход через собственную атмосферу КА. Согласно [106] частицы никогда не могут встретиться с КА, так как их орбиты сокращаются очень быстро, даже для частиц должно быть порядка десятков мкм, чтобы частица могла вернуться на высоты 300-350 км в течение большого промежутка времени. В последнем случае частица должна выбрасываться под углами. Там же были проведены расчеты для пылевых частиц, имеющих начальные скорости (наиболее вероятными являются меньшие скорости), в предположении того, что частицы выбрасывались равномерно со всей поверхности корабля.

Рассмотрим наиболее вероятные источники выброса частиц с КА. Основные данные и аналитическая модель генерации частиц в СВА получены на основании лабораторных данных и известных характеристик корабля Shuttle [106].

Одновременно с утечкой воздуха из полостей может происходить выброс, частиц, находящихся в этой полости ЛА во взвешенном состоянии. Максимально допустимая утечка воздуха из кабины челночного корабля составляет 2,5 кг/день. Если вся утечка происходит через одно цилиндрическое отверстие, то диаметр такого отверстия должен быть 250 мкм. Разумеется, если утечка проходила бы через несколько отверстий, то диаметр каждого из них был бы несколько меньше, такое отверстие способно пропускать частицы диаметром 250 мкм и эти частицы

имеют такое же распределение по размерам, что и воздух полости. При утечке 2,6 кг/день с потоком воздуха будет выноситься 0,34 частиц в секунду с радиусом более 2,5 мкм или 1880 таких частиц за время одного витка [106]. Скорость частицы, вылетающей через прямое отверстие, составляет около 400 м/с. Более вероятно, однако, что утечка воздуха происходит через искривленные отверстия и щели, и после выхода из полости они претерпевают столкновения с другими поверхностями ЛА. Это означает, что скорости частиц лежат в диапазоне от 0 до 400 м/с. Представляет интерес случай, когда частицы попадают в некоторую область и отходят от поверхности КА, в пределах которой они мешают работе какой-либо оптической системы КА. В случае, если внешняя оболочка КА двойная, утечка частиц с большой скоростью устраняется, если вообще она оказывается возможной.

После выхода КА в космос на его поверхности будет оставаться много грязи, даже если поверхность аппарата, а особенно его внутренние отсеки, которые будут открываться в открытом космосе, будут протерты до уровня визуальной чистоты.

Перед тем как рассмотреть вопрос об отрыве частиц пыли с поверхности, рассмотрим причины удержания пыли на поверхности КА. В [106] показано, что в вакууме после десорбции воды главную роль в удержании частиц должны играть ван-дерваальсовы силы. Средняя адгезионная сила $F_a = 0,13d_2$ (в ньютонах), где d_2 – диаметр частицы в метрах. В [106] показаны распределения по скоростям для частиц, покинувших поверхность в экспериментах по ударному воздействию. Таким образом, можно ожидать, что при величинах ускорений, обусловленных работой КА, скорости частиц, покидающих поверхность, будут составлять 10 мс^{-1} . Из-за сложной структуры внутренних поверхностей различных отсеков возникают трудности, связанные с их очисткой, кроме того на поверхностях ЛА имеются ребра, кабели, изоляция. Так как очистить эти области до определенного класса чистоты довольно трудно, то с этих поверхностей отрыв частиц будет происходить интенсивнее.

Другим механизмом освобождения частиц с поверхности является электростатическое отталкивание. В результате фотоэмиссии с поверхностей ЛА испускаются электроны. Величина потенциала ограничивается плазмой, в которой находится космический аппарат. Однако, как показано в [106], при прочих равных условиях ван-дер-ваальсова адгезионная сила примерно в 10^8 раз больше силы электростатического отталкивания. Таким образом, можно ожидать, что зарядка космического корабля и находящихся на нем частиц не будет приводить к отрыву частиц от поверхности.

Возможен также механизм отрыва частиц от поверхности в результате разрыва пузырьков газа, растворенного в различных материалах поверхностей ЛА. Действительный уровень твердой компоненты СВА можно определить только путем измерений в условиях космического пространства.

«Скайлаб» был первым управляемым КА, на котором осуществлен достаточно жесткий контроль твердой компоненты СВА. Таким образом, данные, полученные для этого КА, могут служить исходным материалом для эмпирической оценки загрязнений. На этом ЛА с помощью коронографа S-052 проводились наблюдения солнечной короны, на 5075 фотографиях (с выдержкой 9с) была насчитана 431 хаотичная траектория пылевых частиц, то есть частота колебания частиц составляла примерно 1 частица за 106с. При некоторых предположениях можно считать, что скорость выброса частиц с ЛА составит $1,133\text{с}^{-1}$ (т.е. 1 частица за 0,88с).

Наиболее вероятная угловая скорость движения частиц составляла $4,6 \cdot 10^{-4}$ рад/с, наименьший размер регистрируемых частиц $\approx 6,6$ мкм.

Регистрирующая система для твердой компоненты СВА должна надежно работать при следующем характере твердой компоненты СВА: средняя скорость частиц СВА не превосходит 50см/с, дисперсия размеров частиц составит 0,1-1000 мкм, максимальное регистрируемое расстояние не более 10м (т.к. на

больших расстояниях воздействие частиц на оптическое оборудование, за исключением телескопов, маловероятно). Ожидаемые счетные концентрации частиц составят:

- для $r_s = 0,5$ мкм $\rho_{\sim} = 2,00 * 10^{-4}$ см⁻³;
- для $r_s = 5$ мкм $\rho_{\sim} = 1,00 * 10^{-5}$ см⁻³;
- для $r_s = 50$ мкм $\rho_{\sim} = 6,1 * 10^{-8}$ см⁻³;
- для $r_s = 5000$ мкм $\rho_{\sim} = 8,00 * 10^{-12}$ см⁻³,

то есть максимальная счетная концентрация составит $2,00 * 10^{-4}$ см⁻³ или 1 частица в 5000 см³.

С небольшим произволом зададимся объемом, в пределах которого необходимо осуществить регистрацию (произвол в связи с тем, что конкретная система, на которую оказывает влияние твердая компонента СВА, может иметь самые различные параметры):

- минимальное расстояние от поверхности объекта – 1,5 м;
- максимальное расстояние от поверхности объекта – 10 м;
- диаметр области – 121,5 м.

Система регистрации частиц должна измерять следующие характеристики частиц:

- кинематические характеристики (траекторию движения, составляющие скоростей по трем координатам);
- размер частиц.

Кроме того, система должна удовлетворять следующим требованиям:

- иметь минимально возможную массу и габариты;
- минимальное энергопотребление;
- быть совместимой с другими системами;
- не ухудшать электромагнитную и другую обстановку в области объекта исследования.

Эти первые четыре требования будут уточняться под конкретный объект исследования (в соответствии с его возможностями).

5.4 Модели преобразователей на основе явления инстинкции света в газовой-пылевой среде

Оптические методы измерения параметров твердой компоненты СВА, как и методы измерения параметров атмосферной пыли, основаны на явлении инстинкции света в газовой-пылевой среде. Если считать, что среда, в которую помещены частицы пыли, является непоглощающей, то явление инстинкции определяется поглощением в частицах (то есть трансформацией лучистой энергии в другие виды энергии) и рассеянием света на этих частицах. Инстинкция зависит от химического состава частиц, их размера, формы, ориентации, окружающей среды, концентрации, а также от состояния поляризации и частоты падающего света.

В общем случае, интенсивность света, рассеянного сферической частицей, может быть описана уравнением Ми [107] :

$$J_{\text{рас } \theta} = \frac{\lambda^2}{8\pi^2 R^2} [J_{\perp}(\rho_1, n', \theta) + J_{\parallel}(\rho_1, n', \theta)],$$

где $J_{\text{рас } \theta}$ – интенсивность света, рассеянного сферической частицей под углом θ к падающему потоку, рассчитанная на единицу интенсивности падающего света; R – расстояние от точки наблюдения до частицы; $J_{\perp}(\rho_1, n, \theta)$ и $J_{\parallel}(\rho_1, n, \theta)$ – интенсивность рассеянного света, поляризованного перпендикулярно и параллельно плоскости рассеяния; ρ – оптическая постоянная вещества частицы, $\rho = 2\pi r / \lambda$; r – радиус частицы; λ – длина световой волны.

Для $\rho \ll 1$, то есть для случая, когда размеры частицы значительно меньше длины волны, справедливо рассеяние Рэлея. Согласно [108] в случае поляризованного света:

$$I_{\lambda PAC\Theta} = \frac{2\pi N r^6}{\lambda^4 R^2} \left(\frac{n'^2 - 1}{n'^2 + 2} \right)^2 (1 + \cos^2 \Theta) I_0, \quad (5.4.1)$$

где N – коэффициент преломления среды распространения (для вакуума $N=1$).

Из [108] следует, что для верхних слоев атмосферы, а по-видимому, она вносит существенный вклад в СВА корабля: $n=1,525+i0,003$ (диэлектрические частицы). Формулу (5.4.1) можно переписать в виде

$$I_{\lambda PAC\Theta} = \frac{8\pi N^4 r^6}{\lambda^4 R^2} M F(\Theta) I_0, \quad (5.4.2)$$

где $M = \left(\frac{(ab + c^2) + c^2(b - a)^2}{b^4 + c^4} \right);$

$$a = n^2 + k^2 - 1;$$

$$b = n^2 - k^2 + 2;$$

$F(\Theta) = (1 + \cos^2 \Theta)$ – индикатриса рассеяния.

Например, для $n'=1,525+i0,003$ $M=1,755$, для окиси железа Fe_2O_3 $M=65,35$, а для металлических частиц величина M будет еще больше.

Рэлеевское рассеивание для элементарного объема в телесном угле $d\omega$ под углом θ определится:

$$dF_{\lambda} = \frac{2\pi^2 (n-1)^2 \lambda^{-4}}{N} (1 + \cos^2 \Theta) F_{\lambda} dV d\omega, \quad (5.4.3)$$

где n – коэффициент преломления частиц,

N – число частиц в элементарном объеме dV ;

E_{λ} – освещенность монохроматическим пучком бесконечного элемента $d\omega$;

F_λ – поток рассеянного излучения.

Тогда интегральное рассеяние некоторого конечного объема в некотором телесном угле:

$$E_\lambda = \iint_{V_\Omega} dF_\lambda \quad (5.4.4)$$

Для частиц, соизмеримых и больших длины волны, справедлива только общая формула [117]. Однако в [108] получена упрощенная эмпирическая зависимость:

$$I_{\lambda PAC\Theta} = I_0 \bar{S} F(\Theta) / 4\pi R, \quad (5.4.5)$$

где \bar{S} – среднее геометрическое поперечное сечение частицы произвольной формы.

Индикатриса рассеяния $F(\Theta)$ в этом случае описывается в общем случае довольно ложно и носит очень изрезанный характер. Индикатриса рассеяния земной атмосферы в верхних слоях [109] может быть представлена эмпирической формулой

$$F(\Theta) = 1 + P_\lambda V(\Theta) + \Theta_\lambda \cos^2 \Theta, \quad (5.4.6)$$

где $V(\Theta) = e^{-3\Theta} + e^{-\frac{3}{2}\pi}$.

P_λ и Θ_λ – являются функциями длины волны и, кроме того, зависят от состава рассеивающей среды. Формула (5.4.6) неприменима к узкому интервалу от 0 до $2-3^\circ$ (участок так называемого солнечного ореола), где $F(\theta)$ имеет очень высокий максимум. Согласно [109] типовые значения P_λ и Θ_λ видимой области спектра составляют: $P_\lambda = 10$ и $\Theta_\lambda = 0$.

Приведенные зависимости позволяют рассчитать потенциальные возможности методов, основанных на явлении рассеяния света в различных их модификациях на твердой компоненте СВА. Один из множества модификаций методов, основанных на рассеянии света, показан на рис. 5.5.

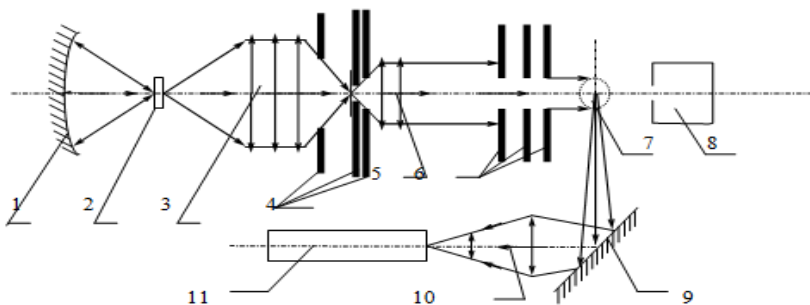


Рис. 5.5. Оптическая схема оптоэлектронного датчика

Обозначения на схеме:

- 1 – сферическое зеркало;
- 2 – нить лампы накаливания;
- 3 – оптический конденсор;
- 4 – система подчисточных диафрагм;
- 5 – объектив прожектора;
- 6 – система подчисточных диафрагм;
- 7 – рабочая зона датчика;
- 8 – световая ловушка;
- 9 – плоскопараллельное зеркало;
- 10 – объектив фотоприемника;
- 11 – фотоприемник (ФЭУ-102).

Характерные свойства лазерного излучения и особенности его взаимодействия с малыми частицами, а также особенности приема оптических (лазерных) сигналов обуславливают специфику построения лазерных локаторов, в чем можно убедиться при рассмотрении их структурных схем. В [110,111] приведены структурные схемы различных лазерных локационных систем (ЛЛС), разработанные с учетом назначения и типа ЛЛС. Это затрудняет их сравнительный анализ и исключает возможность единого подхода к решению задачи и проектированию ЛЛС для определения параметров твердой компоненты СВА ЛА. Поэтому рассмотрим следующую структурную схему ЛЛС, дающую

достаточно полное представление о работе ЛЛС в рамках рассматриваемой задачи. Эта структурная схема (рис. 5.6) описывает ЛЛС для регистрации кинематических характеристик малых частиц СВА (текущие координаты, составляющие скорости по этим координатам, траектория движения и т.д.) и их физических параметров.

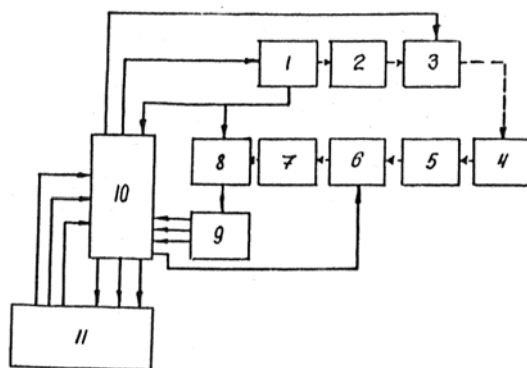


Рис. 5.6. Обобщенная структурная схема ЛЛС

Выбор тех или иных характеристик малых частиц, подлежащих регистрации, в основном будет определять сложность системы вторичной обработки информации (локационных данных) и структуру ЛЛС. Например, при работе в условиях малых концентраций пыли можно несколько загрузить разрешение системы по угловым координатам, которая будет определяться в основном расходимостью зондирующего лазерного пучка, и отказаться от сложного и громоздкого коллиматора 2 и т.д. Так как область целей характеризуется максимальной дальностью до 10м с одновременным требованием минимальной мертвой зоны, то наиболее применимым является фазовый метод лазерной дальнометрии [112]. При работе в достаточно анизотропных и турбулентных средах предпочтительным является реализация фазового метода лазерной дальнометрии на СВЧ – поднесущей (а для устранения фазной неоднородности этих поднесущих должно быть не менее двух), то есть на огибающей (амплитуд-

ная модуляция). При работе на поднесущей упрощается построение канала приема и обработки фазовых лазерных дальномеров. Взаимодействие лазерного луча со сферической частицей в зависимости от размера частицы описывается соответственно уравнениями (5.4.3), (5.4.5).

В условиях орбитального полёта существенное влияние на ЛЛС оказывают фоновые излучения (Солнце, звезды, Луна, излучение Земли). Согласно [113] для рубинового лазера с длиной волны излучения $0,6943 \text{ мкм}$ и приемной антенной в виде зеркала диаметром $D_a=50 \text{ см}$, фокусным рассеянием $F_3=20 \text{ см}$, шириной пропускания оптического интерференционного фильтра перед приемным фотодетектором (ФЭУ-79) $\Delta\lambda_\phi = 3,0 * 10^{-3} \text{ мин}$ мощность фонового излучения на дневной стороне Земли составляет $P_\phi=5,4*10^6 \text{ Вт}$ излучения (на ночной $3*10^{14} \text{ Вт}$). С учетом собственных шумов фотоприемника (с использованием оптимального обнаружителя оптического сигнала на фоне шумов и вероятностью верного обнаружения $P_{об}=0,98$), $P_{пар}$ составит $1,2*10^6 \text{ Вт}$. Можно показать (решая уравнение для максимальной дальности обнаружения), что для максимальной дальности $R_{max}=10 \text{ м}$ и частиц с радиусом $r=0.5-1 \text{ мкм}$ средняя мощность лазера (в режиме непрерывного излучения) составит $P=0,5-1 \text{ Вт}$. При КПД лазера $\eta=1\%$ мощность, подводимая к лазеру, составит $P_0=100 \text{ Вт}$.

Разрешение по угловым координатам будет определяться расхождением лазерного луча на максимальной дальности. Современные твердотельные и газовые лазеры имеют расходимость лазерного пучка излучения $\theta_p=0,5-20 \text{ мрад}$. Объем пространства ΔV , в пределах которого все частицы пыли будут восприниматься как одна с некоторым интегральным блеском:

$$\Delta V = C \Delta\phi (\sin \Theta_p R_{max})^2 / 2\pi f_m, \quad (5.4.7)$$

где C – скорость света ($3,8*10^8 \text{ м/с}$), $\Delta\phi$ – дискрет фазы в ряд, на максимальной дистанции $R_{max}=10 \text{ м}$, с частотой поднесущей

$f_m=100$ мГц, чувствительностью по фазе $=1$ фазового дискриминатора системы, составит: $\Delta V=4*10^5$ см³.

Таким образом, разрывающая способность ЛЛС в этом случае 1 част./ $4*10^5$ см³. Для улучшения этой характеристики необходимо усложнять коллиматор системы (тем самым уменьшая расходимость θ_p), уменьшать дискрет фазы $\Delta\phi$ фазового дискриминатора или увеличить частоту огибающей оптического сигнала f_m . Если концентрация твердой компоненты СВА будет превосходить величину $2.5*10^6$ част.·см³, то ЛЛС будет иметь погрешность определения счетной концентрации пыли СВА:

$$\varepsilon = \begin{cases} 0 & \rho \leq \rho_{пор} \\ (\rho - \rho_{пор}) / \rho_{пор} & \rho > \rho_{пор} \end{cases} \quad (5.4.8)$$

где ε – погрешность определения счетной концентрации,
 ρ – реальная счетная концентрация.

$\rho_{пор}$ – пороговая счетная концентрация ($2,5*10^{-6}$ част.·см³ в приведенных оценочных расчетах).

При мощности зондирующего лазера $R_{изл}=0,5-1$ Вт предельный радиус частицы, которая будет зафиксирована ЛЛС, равен $0,5$ мкм. Для регистрации более мелких частиц необходимо либо повышать мощность зондирующего излучения, либо менять геометрию системы, так как при взаимодействии света с мелкими частицами ($\lambda > 2r_p$) проявляется эффект Ми, который заключается в том, что основная интенсивность рассеянного света имеет направление, совпадающее с направлением падающего света, а в сторону фотоприемника, который расположен в непосредственной близости от ЛПУ, рассеивается незначительная часть падающей интенсивности. Изменение геометрии ЛЛС, то есть разнесение ЛПУ и фотоприемника, связано со значительными трудностями сопряжения в области целей лазерного луча ЛПУ и диаграммы направленности приемной оптической антенны.

Анализ состояния современной элементной базы для ЛЛС проведен в [114]. К достоинствам ЛЛС регистрации параметров твердой компоненты СВА ЛА относятся ее глобальный харак-

тер, то есть возможность обзора значительной пространственной области СВА:

- возможность регистрации кинематических характеристик частиц пыли СВА во времени, что позволяет изучать динамику твердой компоненты СВА;
- высокая помехоустойчивость от электромагнитных возмущений космического и атмосферного (верхних слоев) происхождения;
- узкие диаграммы направленности приемной и передающей оптических систем позволяют простыми средствами реализовать хорошее соотношение сигнал/шум ЛЛС.

Лазерная локация наряду с преимуществами имеет и существенные недостатки:

- в случае, если концентрация твердой компоненты СВА превысит пороговую погрешность, измерения счетной концентрации пыли и параметров движения частиц (возможные ошибки «переписи» частиц в последующих циклах сканирования) значительно увеличиваются;
- наиболее громоздкими, уязвимыми в отношении вибраций являются оптические элементы системы, требующие периодической юстировки, обладающие высокими габаритно-массовыми показателями и высокой стоимостью;
- для обеспечения значительных углов сканирования (более 1°) в настоящее время получили наибольшее распространение оптико-механические системы сканирования, основанные на механическом вращательном или колебательном перемещении элементов преломляющей или отражающей оптики (призм, зеркал), основными недостатками их являются невысокие скорости сканирования (из-за больших перемещаемых масс), небольшой срок службы, снижение точности с увеличением длительности работы, сбои в работе в ус-

ловиях вибраций и перепада температур, высокие энергомассогабаритные показатели, значительная стоимость;

- изменение физических свойств оптики в условиях воздействия факторов космического пространства (потоки высокоэнергетических заряженных частиц, образование газовой-пылевой пленки на поверхности оптики).

Перечисленные недостатки делают проблематичным использование ЛЛС в условиях орбитального полета. Некоторые вопросы, касающиеся применения ЛЛС для регистрации твердой компоненты СВА, требуют дополнительного изучения.

По своей физической сущности и принципу работы лазерные системы видения (ЛСВ) занимают промежуточное положение между активными ЛЛС обзора пространства и телевизионными системами. Для осуществления лазерного видения с помощью оптико-электронных систем активного наблюдения можно использовать сканирование по элементам объекта (частица пыли СВА) или его изображения. По характеру способов развертки и различию характеристик направленности передающего и приемного устройств возможны три варианта построения ЛСВ [115]:

1. Источник подсветки – лазерное передающее устройство (ЛПУ), имеет узкую диаграмму направленности, а оптическое приемное устройство (ОПУ) – широкую, то есть $\varpi \ll \Omega$ (рис. 5.7, а), где Ω и ϖ – углы, характеризующие поле зрения ОПУ и расходимость ЛПУ.

2. Обе диаграммы направленности узкие, то есть $\varpi \approx \Omega$ (рис. 5.7, б);

3. ЛПУ имеет широкую диаграмму направленности, ОПУ – узкую, то есть $\varpi \ll \Omega$ (рис. 5.7, в).

В системе первого типа изображение формируется в результате сканирования пространства лазерным пучком в пределах угла обзора, ограниченного диаграммой направленности ОПУ Ω . Размер элементов разложения, на которые раскладывается воспроизводимое изображение объекта, определяется пятном,

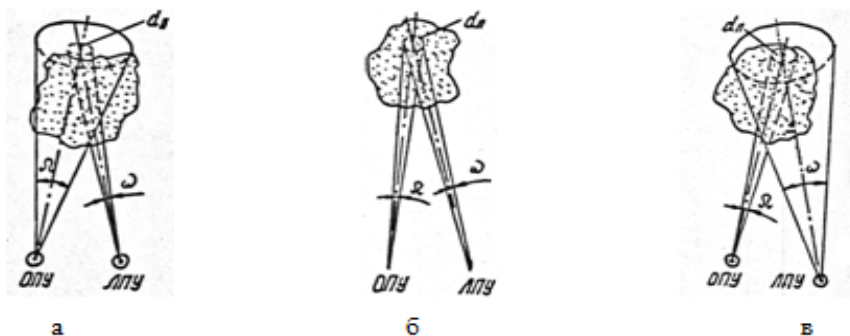


Рис. 5.7. Способы развертки и характеристики направленности передающего и приемного устройств ЛСВ

засвечиваемым источником подсветки (в этом случае все частицы пыли, которые попали в это пятно на дальностях от R_{\min} до R_{\max} , будут восприниматься системой как некоторое пространственное тело с суммарным блеском), диаметр которого

$d_n = 2\sqrt{\frac{\omega_0}{\pi}} R_{\min}$. В системе второго типа диаграммы направленности ЛЛУ и ОПУ сканируют синхронно, имея общую точку пересечения осей диаграмм. В системе третьего типа ЛПУ равномерно освещает плоскость объекта в пределах угла обзора. ОПУ, имеющие узкую диаграмму направленности, сканируют область обзора с элементом разложения $d_n = 2\sqrt{\frac{\Omega}{\pi}} R_{\min}$.

В системах первого и второго типов в качестве фотодетектора используют фотоэлектронные умножители (ФЭУ).

Система третьего типа может быть выполнена на основе передающей телевизионной трубки, электронно-оптического преобразователя, работающего в режиме усиления яркости. По режиму работы ЛПУ в передатчике любой из трех систем могут использоваться как импульсные, так и непрерывные лазеры. ЛВС рассчитывают на основе теории линейной пространственной фильтрации.

Можно показать, что с учетом как собственных шумов фотоприемника, так и с учетом засветок от Земли, Солнца, звезд, ЛСВ обладает теми же характеристиками, что описанная выше локационная лазерная система.

Существенным недостатком описанных ЛВС является следующий:

- изображение объекта, восстанавливаемое в плоскости ОПУ, несет информацию объекта в двух координатах α и ρ (α – азимут, ρ – угол места) относительно ЛВС. Величина же наклонной дальности до объекта остается неопределенной. Кроме того, в этих системах, несмотря на существенные упрощения конструкции оптических систем, остается все-таки один узел оптического сканирования, которому присущи значительные недостатки. В работе предложена несколько иная лазерная система видения (СЛСВ), свободная от указанных недостатков.

Вариант построения СЛСВ дан на рис. 5.8.

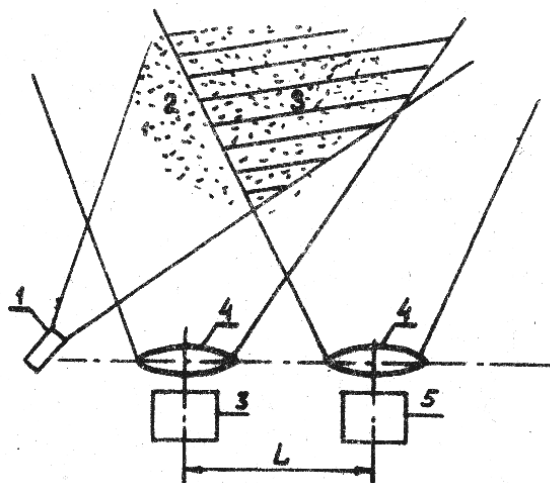


Рис. 5.8. Вариант построения СЛСВ

Лазер подсветки 1, обладающий большой расходимостью ($\vartheta_p \approx 30^\circ$), освещает некоторую область СВА ЛА. Свет, рассеянный частицами пыли, собирается объектами 4 и фокусируется ими на фотокатодах передающих телевизионных трубок 5. Рабочая область 3 СЛСВ образуется пересечением в пространстве диаграммы направленности лазерного излучения и пространственных апертур объективов 4 передающих трубок 5. Благодаря тому, что оси приемных оптических систем лежат в одной плоскости, параллельны и разнесены на величину базы L , измерив координаты изображений частиц в плоскости фотокатодов, можно определить все три координаты каждой частицы (α , β , R), а также скорости частиц по этим координатам. Укрупненный алгоритм вычислений координат и скоростей показан на рис. 5.9.

Алгоритм заключается в следующем: каждый кадр состоит из двух одновременно снятых полукадров, получаемых на одном и на другом фотоприемниках. Пусть это будет для общности i -й кадр. Спустя некоторое время Δt производится съемка $i+1$ кадра, также состоящего из двух полукадров. В блоках 11, 12, 21, 22 происходит нумерация частиц на каждом из полукадров и определение их координат, например, в системах, показанных на рис. 5.8. Далее множество пронумерованных координат частиц полукадров поступает в блок 3. В этом блоке множеству частиц n_{1i} 1-го полукадра с координатами x_{1i} и y_{1i} ставится по определенному алгоритму в соответствие множество частиц K_{2i} , с координатами x_{2i} , и y_{2i} . Аналогичной обработке подвергается и $i+1$ кадр. Кроме того, в этом блоке множеству частиц 1-го полукадра $i+1$ -го кадра ставится в соответствие множество частиц 1-го полукадра i -го кадра. Таким образом, все частицы в этом блоке найдены на всех четырех кадрах и для каждой из них определены четыре координаты в момент времени t_0 и $t_0 + \Delta t$, то есть определены множества $n_i(x_{1i}, x_{2i}, y_{1i}, y_{2i})$ и $n_{i+1}(x_{1,i+1}, x_{2,i+1}, y_{1,i+1}, y_{2,i+1})$.

их скоростей по этим координатам. Обработка по приведенному алгоритму может проводиться уже на Земле с использованием ЭВМ большой мощности. При этом на борту ЛА можно будет проводить только первичную обработку информации.

Таким образом, в СЛСВ линейную пространственную обработку информации заменяем системой обработки изображения (системой распознавания образов) с использованием ЭВМ.

Можно показать, что при пороговой освещенности фотокатода суперорбитона ЛИ201 равной: $E_{пор} = 10^{-3} - 10^{-2}$ лк, фокусном расстоянии объективов $F = 5$ см, диаметре объективов $D = 5$ см, расходимости лазерного пучка $\theta_p = 30^\circ$, величине базы $L = 0,8$ м, на максимальной дальности $R_{max} = 10$ м величина непрерывной мощности лазера составит $P_0 = 0,2 - 0,5$ Вт, что является вполне приемлемым. Радиус частиц при расчетах был выбран $0,5$ мкм при длине волны лазерного излучения $\lambda = 0,56$ мкм. Более подробные исследования СЛСВ не проводились. Этот вопрос требует дополнительного изучения. Можно предположить, что разрешение по координатам и дальности у этой системы такое же, как и у ЛЛС, и будет определяться разрешающей способностью фотокатода на краях, то есть в данном случае также существует величина пороговой счетной концентрации частиц пыли СВА, и при концентрациях выше пороговой система будет давать погрешность измерений. К достоинствам системы следует отнести следующие:

- простота конструкций приемных оптических систем;
- статичность системы, то есть отсутствие узлов сканирования;
- глобальность системы;
- использование недорогих доступных полупроводниковых лазеров.

СЛСВ обладает всеми теми же недостатками, которые присущи оптическим системам, кроме того имеет сложный алгоритм вторичной обработки информации о твердой компоненте СВА. Несмотря на это, СЛСВ является наиболее перспективной

для применения в условиях орбитального полета среди других оптических систем регистрации глобального характера.

Достижение требуемой чувствительности по размерам частиц является наиболее важным вопросом при проектировании системы стереоскопического видения.

Для исследования характеристик низкоскоростных частиц с целью возможности создания стереоскопической системы видения, в которой в качестве источника света используется лампа накаливания, была собрана экспериментальная установка, схематично показанная на рис. 5.10.

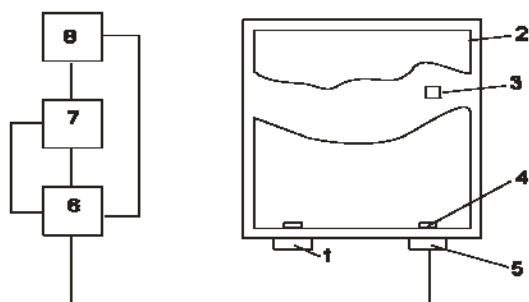
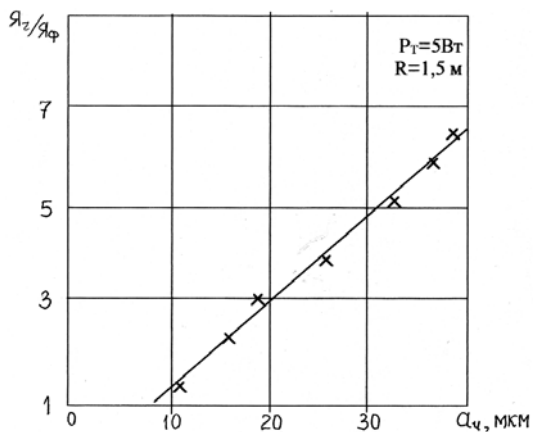


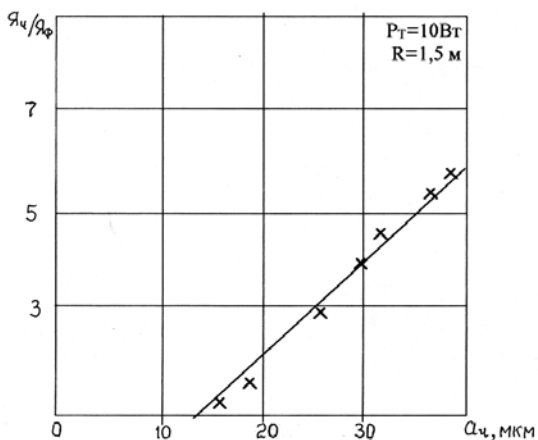
Рис. 5.10. Блок-схема экспериментальной установки

С помощью нее представляется возможным определение чувствительности системы по размеру частиц. Она представляет собой светопроницаемую камеру 2, внутренняя поверхность которой выполнена в виде двух слоев черной ворсистой ткани. В верхней крышке камеры имеется небольшое закрываемое отверстие 3, в которое сыпались калиброванные частицы корунда диаметром 15...30 мкм. В боковой стенке камеры также сделаны отверстия, в которые установлены источник света 1 и твердотельная телевизионная камера с ЭОП 5. Телекамера через плату видеоинтерфейса 6 сопрягалась с компьютером 8. Монитор 7 непосредственно подключался к видеокамере с тем, чтобы по телеизображению можно было оперативно менять геометрию системы. В качестве источника света использовались фотолампы мощностью 100Вт и 200 Вт, а затем вспышка. Рабочая каме-

ра имела размеры $0,8 \times 0,8 \times 2$ м. Полученные изображения обрабатывались с помощью разработанных алгоритмов. Максимальную чувствительность системы можно оценить только в условиях открытого темного пространства, где нет близких предметов, которые ухудшают соотношение сигнал/шум. Результаты экспериментов представлены на рис. 5.11.



а)



б)

Рис. 5.11. Результаты экспериментов

При мощности источника подсветки в телесном угле 30° равной 5 Вт, что соответствует общей мощности лампы 100 Вт, при визуальном сравнении яркостей частицы начинали различаться на фоне засветок, начиная с 8...10 мкм, причем уверенное различие (Яг/Яф) начиналось с 20 мкм. При увеличенной мощности источника до 10-12 Вт чувствительность падала, что объясняется более быстрым ростом засветки от стенок по сравнению с яркостью частиц. В условиях свободного пространства, что соответствует условиям СВА, чувствительность системы улучшится в 2...2,5 раза.

Рассмотрим величину чувствительности системы на дальности до 10м с учетом того, что в качестве фотоприемников применены твердотельные видеокамеры (матрица ПЗС 1200ЦМ7) с электронно-оптическим преобразователем (ЭОП) ТН 9303, имеющим пороговую освещенность 0,01... 0,001 лк. Фокусные расстояния объектов $f=50$ мм, относительный фокус $\Delta=1/2$. Источником подсветки является лампа накаливания с углом расходимости $\theta_n=30^\circ$, что формируется зеркально-линзовой оптикой. Площадь сферического фронта излучения источника на дальности R:

$$S_{сфR} = \pi R^2 \sin^2 \frac{\theta_u}{2} . \quad (5.4.9)$$

Плотность потока мощности (интенсивность) излучения:

$$I_0 = P_u K_i K / S_{сфR} , \quad (5.4.10)$$

где P_u – средняя мощность излучения источника;

K_i – коэффициент пропускания среды (для вакуума $K=1$);

K_1 – коэффициент прозрачности оптики источника (для про-светленной оптики $K_1=1$). В общем случае рассеяние света на мелких частицах описывается теорией Ми. Однако для случая, когда размеры частицы соизмеримы с длиной волны облучения, справедливо рассеивание Рэлея. Для частиц с размерами $a \approx \lambda$ интенсивность света, рассеянного под углом θ , описывается соотношением

$$I_s = \frac{8\pi^4 Na^6}{\lambda^4 R^2} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right| (1 + \cos^2 \theta) I_0,$$

где I_s – интенсивность рассеянного света под углом;

I_0 – интенсивность падающего света;

N – комплексный коэффициент преломления среды распространения света (для вакуума $N=1$);

m – относительный комплексный показатель преломления вещества частицы,

$$m = m'' + ik'' = \frac{n' + ik'}{N} = n' + ik' = m';$$

m' – абсолютный комплексный показатель преломления вещества частицы (относительно вакуума);

λ – длина волны света;

R – расстояние от источника света до частицы;

a – размер (диаметр) частицы.

Формулу для интенсивности света I_s представим в виде

$$I_s = \frac{8\pi^4 Na^6}{\lambda^4 R^2} MFI_0,$$

где $M = \frac{(ab + c^2) + c^2(b - a)}{b^2 + c^2};$

$$F = (\cos^2 \theta);$$

$$a = (n'^2 + k'^2 - 1), b = (n'^2 + k'^2 + 2), c = 2n'^2 k'^2.$$

Согласно (174) для некоторых веществ, которые по-видимому, входят в состав СВА ЛА, вычислены величины показателей преломления:

$m=1,525+i0,003$	$M=1,755$	атмосферная пыль
$m=1,525+i0,005$	$M=1,7559$	растворимые частицы
$m=3,014+i0,003$	$M=0,015$	окись железа

Спектральная плотность излучения источника, спектральная чувствительность фотокатода ЭОПа и спектральная прозрачность оптики существенно зависят от длины волны света. Поэтому, чтобы не усложнять вычислений и учитывать тот факт, что все телеприемники коррелированы с человеческим глазом, а спектральный состав излучения источника близок к дневному свету, введем суммарные потери на уровне $K_{\Pi} = 0,8$ для $\lambda=0,55$ мкм, что является аппроксимацией кривой видимости человеческого глаза прямоугольником по уровню 0,8. Величина энергетического потока лучистой энергии через объектив фотоприемника определится из соотношения

$$\Phi_{\text{эо}} = \frac{\pi D^2 \cos^2 \gamma}{4} I_s, \quad (5.4.11)$$

где D – диаметр объектива, γ – угол между оптической осью приемной трубки и направлением на частицу ($\gamma=30^\circ$). Величина светового потока составит:

$$\Phi_{\text{д}} = \frac{\pi D^2 \cos^2 \gamma}{4} I_s K_m, \quad (5.4.12)$$

где $m=683$ лм/Вт.

В фокальной плоскости изображение частицы будет иметь дифракционный характер и определится из формулы:

$$S_{\text{из}} = \pi \left(1,22 \frac{\lambda f}{D} \right)^2, \quad (5.4.13)$$

где f – фокусное расстояние объектива, D – диаметр входного отверстия ($D=f\Delta$). Таким образом, освещенность в области фотокатода ЭОПа определится из соотношения

$$E = K_m \frac{1,34 \pi^3 N a^6 M F D^4 \cos^2 \gamma}{\lambda^6 R^4 f^2 \sin^2 \frac{\theta_4}{2}}. \quad (5.4.14)$$

Расчеты чувствительности системы по полученной формуле представлены на рис. 5.12. Это позволяет сделать следующий вывод: при приемлемой мощности источника подсветки (до 10 Вт) теоретически удастся зарегистрировать частицы СВА ДА размером до 0,5 мкм на расстоянии 2... 10м.

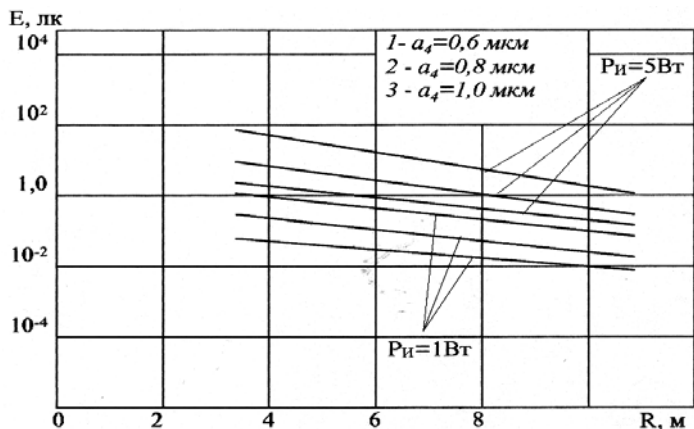


Рис. 5.12. Зависимость локальной освещенности в области матрицы от размера частиц, мощности источника и расстояния до системы

5.5 Модели преобразователя на основе зарядки частиц

В основу индукционного метода положено определение индуцированного на системе измерительных электродов заряда, возникающего при движении в окрестности заряженных пылевых частиц [34]. Величина заряда является мерой массовой конструкции пыли. Существенным преимуществом метода является то, что для измерения общего заряда частиц пыли не требуется осаждать их на электроде.

Величина заряда Q , наведенного на измерительном электроде (системе) движущимся зарядом q , может быть определена по формуле Шокли-Рано (30):

$$Q = -q\Phi_{\varepsilon}(x,y,z), \quad (5.5.1)$$

где $\Phi_{\varepsilon}(x,y,z)$ – потенциал фиктивного лапласовского поля системы электродов в точке нахождения заряда q , которое возникло бы при подаче на измерительный электрод электрического единичного потенциала при заземлении остальных электродов и удалении из системы заряда на бесконечность.

Сила тока во внешней цепи, обусловленная наведенным зарядом q , равна:

$$I = -\frac{dQ}{dt} = q\frac{d\Phi}{dt}. \quad (5.5.2)$$

Выражение (5.5.2) определяет связь между зарядом q движущейся частицы и выходным сигналом системы измерительных электродов. В случае применения сетки из параллельных тонких проводков форма тока не зависит практически от места пролета частицы через сетку. Незначительно меняется только амплитуда импульса при смещении линии прохождения частицы к краю сетки. В качестве измерительной системы может быть применена и система из плоскопараллельных пластин. В этом случае форма выходного тока будет иметь более пологий вид, хотя ход этой кривой аналогичен случаю сетки. Амплитуда импульса выходного тока будет несколько меньше, чем в случае сетки, и будет определяться исключительно геометрией пластин. Измерительный электрод в виде кольца дает выходной ток. Амплитуда i_{\max} и ширина импульса будут определяться геометрией кольца и относительной радиальной координатой пролета заряженной частицы $S=r/R$ (где r – радиальная координата пролета частицы, R – радиус кольца). С увеличением S форма импульса приближается к прямоугольной и сокращается его длительность [34]. Зависимость амплитуды и формы выходного импульса тока системы измерительных электродов от координаты пролета частицы является одним из основных источников погрешности метода. Снижение ее может быть достигнуто оптимальным выбором геометрии системы электродов.

Суммарный заряд SQ, наведенный в системе электродов при проходе через систему частиц, определится по формуле

$$\sum Q = -\sum_{i=1}^N q_i \Phi_{\ominus}(x_i, y_i, z_i), \quad (5.5.3)$$

где q_i и $\Phi_{\ominus}(x_i, y_i, z_i)$ – величины, характеризующие i -ю частицу. Суммарный заряд зависит от геометрии системы измерительных электродов, но с достаточной для практики точности можно считать максимальный индуцированный заряд равным суммарному заряду всех частиц, прошедших через систему.

Притеснение индукционного метода позволяет создать пылемеры довольно простой конструкции. Работает система следующим образом. Коммутатор опрашивает через усилители-интеграторы систему первичных датчиков. Сигнал с коммутатора поступает на АЦП. Параллельный цифровой код с АЦП подается на регистр сдвига и преобразуется в последовательный. Тактовый генератор осуществляет синхронизацию всей системы.

Погрешность метода можно существенно уменьшить, если частицы пыли предварительно заряжать [35]. Достоинствами зарядно-индукционного метода с предварительной зарядкой частиц, пыли является, во-первых, высокая чувствительность (0,1 – 1 мг/м), т.к. приобретаемый частицами заряд значительно превышает заряды естественного происхождения, во-вторых, одинаковые по размерам частицы приобретают приблизительно одинаковые заряды, пропорциональные их поверхности. Это позволяет регистрировать отдельные частицы и определять размеры этих частиц.

Существует много методов зарядки частиц. Методы, использующие различные электрические эффекты в газовой среде (коронный разряд [36]), в условиях высокого вакуума неприменимы. В условиях орбитального полета возможно применение двух методов предварительной зарядки:

- зарядка электронным пучком,
- контактно-электронно-электрический метод.

Величина заряда на пылевой частице сферической формы определяется по формулам:

$$q(t) = D(1 - e^{-Bt}), \quad (5.5.4)$$

$$D = 4\pi r_r \varepsilon_0 U_{a2},$$

$$B = j \frac{r_r}{4\varepsilon_0 U_{a2}},$$

где t – время взаимодействия частицы с пучком,

r_r – радиус пылевой частицы,

U_{a2} – напряжение на втором аноде,

j – плотность тока в электронном пучке,

ε_0 – диэлектрическая постоянная.

За достаточно короткое время ($t \leq 100$ мс) частица в интервале размеров $r = 0,1 \div 1000$ мкм приобретает заряд, достаточный для регистрации системой первичных датчиков на фоне космических шумов, обусловленных потоком заряженных частиц космического происхождения через эти датчики (протонов), и ограничивается сверху величиной g_{\max}

$$g_{\max} = E_a 4\pi \varepsilon_0 r_r^2, \quad (5.5.5)$$

где E_a – величина напряженности электрического поля на поверхности частицы, при достижении которой начинается автоэлектронная эмиссия с поверхности частицы, $E_a \sim 10^9$ В/м.

Величины U_{a2} и j при этом составляют $U_{a2} = 15$ кВ, $j = 200$ А/м². Контактно-электрический метод основан на способности пылевых частиц электролизироваться при соприкосновении с твердым материалом, при этом сила тока (импульсы тока) является мерой концентрации частиц пыли. Для зарядки частиц используются следующие виды электризации: статико-электрическая (электризация при разделении твердого тела на части), баллоэлектрическая (электризация при соударении твердых тел), трибоэлек-

трическая (электризация при относительном перемещении соприкасающихся твердых тел). На электризацию частиц пыли при взаимодействии их с преградами оказывают влияние физико-химические свойства частиц и материала, из которого выполнен электризатор, дисперсный состав пыли, скорость движения частиц, их температура и т.д. [37-38]. Так согласно [38] знак заряда частиц зависит от свойств пыли (неметаллическая пыль приобретает положительный заряд, металлическая – отрицательный).

Количество электричества Q у образующихся при трении двух тел равно

$$Q=HS (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) , \quad (5.5.6)$$

где H – константа, зависящая от состояния поверхности, условий среды и других факторов,

S – поверхность соприкосновения тел,

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – диэлектрические проницаемости соприкасающихся тел.

Наиболее универсальными материалами для электризатора являются: асбоцемент, фторопласт, эпоксадная смола с наполнителями, причем первые два материала достаточно технологичны и термостойки [39]. Влияние дисперсного состава пыли на электролизацию частиц объясняется тем, что для частиц пыли с высоким удельным электрическим сопротивлением величина заряда определяется числом контактов с электризатором и характером движения частиц относительно электризатора. Последний, в свою очередь, зависит от размеров и формы частиц, скорости их движения и других факторов.

Влияние скорости движения частиц на их заряд весьма существенно. Вначале с ростом скорости потока суммарный заряд частиц возрастает, что можно объяснить увеличением силы взаимодействия частиц с поверхностью электризатора. При скоростях движения порядка 100м/с заряд потока достигает наименьшего значения. Даже с ростом скорости заряд уменьшается, т.к. большая часть частиц уже не успевает контактировать с по-

верхностью электризатора и пролетают мимо него. Для каждого типа электризации и каждой конструкции первичного измерительного преобразователя существует оптимальная область скоростей движения. Параметры первичного измерительного преобразователя также влияют на чувствительность метода.

Индукционный метод регистрации твердой компоненты СВА КА имеет следующие недостатки: в случае регистрации естественных зарядов частиц и в случае их предварительной зарядки одним из описанных методов при корпускулярных возмущениях космического фона (вспышки Солнца, выход КД из тени Земли) уровень фона в первичных преобразователях может ухудшить соотношение шум/сигнал вплоть до того, что придется применять оптимальную обработку на фоне сильных помех. Если предположить, что при корпускулярных возмущениях распределение, например, электронов по скоростям будет таким же, как и в радиационных поясах Земли на расстоянии $R=0,03 \div 0,04R_3$, где $R_3=6378\text{км}$, и будет описываться выражением (данные получены при полете «Эксплоера 17»), то

$$I=Be^{-aw}, \quad (5.5.7)$$

где I – плотность потока электронов,

$$[I]=1/(\text{см}/\text{с}),$$

w – энергия электронов, кэВ в интервале (40:∞),

$$a=3,77*10^{-3} \text{кэВ}^{-1},$$

$$B=8,7*10^7.$$

Плотность потока через первичный преобразователь площадью S или заряд, переносимый потоком в единицу времени через площадку S :

$$j=\int_{40}^{\infty} g_e S B e^{-qw} dw = Q1, \quad (5.5.8)$$

где заряд электрона $q_e=1,6*10^{-19}\text{К}$. При $S=10\text{см}^2$ $Q=10^{-10} \div 10^{-9}\text{К}$, т.е. величина суммарного фонового заряда оказывается соизмеримой с величиной максимального заряда сферической частицы

с $r_k=10-100$ мом. Т.к. предположительно частицы пыли СВА медленны: $Vr=20$ см/с, то можно показать, что спектры наведенного тока от частиц пыли и потока электронов имеют различный характер. В этом случае добиться относительно большой вероятности обнаружения полезного сигнала на фоне сильных помех можно с использованием методов оптимальной обработки.

Последнее обстоятельство значительно усложняет систему и накладывает ограничения на временной режим работы (работа в тени Земли и при отсутствии корпускулярных возмущений верхних слоев атмосферы, т.к. реальные интенсивности потоков электронов и протонов через первичные преобразователи оценить пока довольно трудно).

Громоздкость системы первичных датчиков, особенно для регистрации распределения твердой компоненты СВА в некоторой протяженной области или различных точках КА, требует дополнительного изучения проблемы размещения на борту конкретного КА.

Существенным недостатком метода является невозможность регистрации в значительном пространстве без дополнительного усложнения (разветвленности) системы первичных датчиков.

Использование в индукционном методе контактно-электрической предварительной зарядки пылевых частиц СВА представляется проблематичным. В случае применения электризации в условиях достаточно плотной газовой атмосферы ($P \sim 100$ мм рт.ст.) эффективность зарядки пыли достигается прокачкой газового потока через электризатор с установкой перед пробоотборной трубкой завихрителя (для придания частицам пыли спиралеобразного движения) [38]. Оптимальная скорость газового потока в этом случае составляет 105-115 м/с. В условиях орбитального полета ($P = 10^{-5}$ мм рт.ст.) скорость движения пыли СВА видимо невелика ($V \sim 20$ см/с) и реальные концентрации составляют 50 см, которые в процессе полета

будут уменьшаться. Так что в этих условиях корреляция между концентрацией частиц на входе электризатора и наведенный ток будут очень слабыми. В силу сказанного перспективным является метод предварительной зарядки при помощи электронного пучка.

К достоинствам метода индукции относятся:

- первичные датчики практически не вносят возмущения в СЗА КА,
- простая аппаратная реализация средств первичной обработки информации, что обеспечивает ее надежность, простоту обслуживания, ремонтпригодность,
- низкое энергопотребление ($P_{\text{потр}} \leq 10$ Вт ориентировочно),
- незначительная масса (менее 5 кг),
- невысокая стоимость аппаратуры.

Рассмотрим процесс зарядки сферической частицы.

5.6 Движение частиц после отрыва от поверхности КА

Систему пылевых частиц, движущихся в атмосфере Земли после отрыва от КА, можно описать динамикой Гамильтона. Как известно, в гамильтоновой динамике система, состоящая из N частиц, в любой момент времени характеризуется совокупностью обобщенных координат q_1, \dots, q_N и обобщенных импульсов p_1, \dots, p_N сопряженных координатам.

Движение пылевых частиц полностью определено, если задан гамильтониан $H(q, p)$. При этом уравнения движения имеют вид

$$\dot{q}_i = \frac{\partial H(q, p)}{\partial p_i}; \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial H(q, p)}{\partial q_i}.$$

Такая система $2N$ уравнений позволяет определить единственным образом значения q_i, p_i во все моменты времени по их начальным значениям q_{i0}, p_{i0} . Гамильтониан системы частиц естественно представить в виде суммы трех членов:

$$H = H_0 + H' + H^F.$$

Здесь член H_0 соответствует свободному движению не взаимодействующих частиц в отсутствие внешнего поля. Это просто кинетическая энергия. В силу аддитивности она представляет собой сумму N членов, каждый из которого зависит только от импульса одиночной частицы:

$$H_0 = \sum_{j=0}^N H_{0j}, \quad \text{где} \quad H_{0j} = \frac{p_j^2}{2m}.$$

Член H' учитывает взаимодействия между частицами: он представляет собой потенциал межмолекулярных сил. Его нельзя представить в виде суммы членов, каждый из которых соответствует отдельно взятой частице. H' можно представить в виде суммы членов, каждый из которых зависит от канонических переменных двух частиц:

$$H' = \sum_{j=1}^N \sum_{n=1}^N V_{jn}.$$

Сила, действующая на частицу n со стороны частицы j , должна быть одной и той же, независимо от того, изолированы частицы или находятся в окружении других частиц данной системы. Более того, такое взаимодействие практически зависит только от абсолютной величины расстояния между частицами.

Член H^F описывает воздействие внешнего поля, определяемого его потенциалом V^F . Поле действует на каждую частицу

цу в отдельности. Таким образом, воздействие поля описывается суммой членов, каждый из которых зависит от канонических переменных отдельной частицы:

$$H^F = \sum_{j=1}^N V_j^F.$$

В случае электрического и гравитационного полей V_j^F зависит только от положения частицы, в случае магнитного поля потенциал взаимодействия зависит и от обобщенного импульса частицы.

При расчете движения частиц взаимодействием между ними можно пренебречь в силу малости их массы и значительного расстояния между ними. Система частиц испытывает внешнее гравитационное воздействие со стороны Земли и воздействие со стороны электромагнитных полей в околоземном космическом пространстве. Ясно, что электромагнитное взаимодействие возможно только в том случае, если частицы заряжены. Сила гравитационного взаимодействия \bar{F}_z определяется выражением

$$\bar{F}_z = \gamma \frac{mM_3}{r^2} \frac{\bar{r}}{r}.$$

По абсолютной величине она зависит только от величины \bar{r} и направлена в каждой точке вдоль радиуса-вектора. Сила электромагнитного взаимодействия \bar{F}_3 определяется выражением

$$\bar{F}_3 = q\bar{E} + q[v\bar{B}].$$

Кроме указанных, в уравнения движения можно добавить еще диссипативные силы аэродинамического сопротивления.

Однако, ограничившись рассмотрением движения незаряженной частицы при отсутствии аэродинамического сопротивления, получим решение уравнений движения в виде

$$x = x_0 + 6(\sin \omega t - \omega t)y_0 + \left(\frac{4}{\omega} \sin \omega t - 3t\right)v_{x0} - \frac{2}{\omega}(1 - \cos \omega t)v_{y0},$$

$$y = (4 - 3\cos \omega t)y_0 + \frac{2}{\omega}(1 - \cos \omega t)v_{x0} - \frac{1}{\omega} \sin \omega t v_{y0},$$

$$z = \cos \omega t z_0 + \frac{1}{\omega} \sin \omega t v_{z0}.$$

Здесь x_0, y_0, z_0 – начальные значения координат, v_{x0}, v_{y0}, v_{z0} – начальные значения компонент вектора скорости.

Следующим этапом при решении является определение начальных условий. Так как диаметры траекторий, описываемых частицами, много больше размеров КА, то можно считать, что начальные значения координат всех частиц совпадают с координатами КА. Начальные значения скоростей определяются факторами, производящими отрыв частиц от поверхности КА.

Для решения уравнений движения частиц в окрестности КА необходимо задание начальных условий:

- начальных значений координат частиц;
- начальных значений скоростей частиц.

Очевидно, однако, что полное знание начальных координат и скоростей частиц в окрестности КА невозможно. В этой связи необходимо выработать другой подход к определению начальных условий. Вместо начальных значений координат частиц можно использовать начальную поверхностную концентрацию частиц n . Простейшим и наиболее распространенным случаем является распределение поверхностной концентрации частиц, зависящее от размера частиц, но не зависящее от координат на поверхности:

$$n = n(R),$$

где R – размер частицы.

Вместо начальных значений скоростей можно использовать диаграмму направленности процессов отрыва частиц от поверхности. Наиболее широкое распространение на практике получи-

ло диффузное рассеяние, при котором диаграмма направленности имеет вид

$$F(\theta) = \frac{\cos(\theta)}{\pi},$$

где θ – угол, отсчитываемый от нормали к поверхности КА.

Выражение (5.6.1) позволяет определять вероятности вылета частицы с поверхности в том или ином направлении. Так, вероятность вылета частицы в направлении, определяемом углом θ в телесном угле $d\Omega$, будет равна:

$$d\omega = \frac{\cos(\theta)}{\pi} d\Omega. \quad (5.6.1)$$

Абсолютная величина скорости движения вылетевшей частицы будет определяться значением того возмущающего фактора, который вызвал отрыв частицы от поверхности КА. Кинетическая энергия T оторвавшейся частицы может быть определена выражением

$$T = E_{\text{возм}} - E_{\text{св}},$$

где $E_{\text{возм}}$ – энергия возмущающего фактора, $E_{\text{св}}$ – энергия связи частицы с поверхностью.

Начальные условия для частиц полагаются равными 750 (MIL-STD-1246). При этом максимальные уровни загрязнения поверхности пылевыми частицами следующие:

- число частиц размером 50 мкм не более $8145/0,1\text{м}^2$;
- число частиц размером 100 мкм не более $743/0,1\text{м}^2$;
- число частиц размером 250 мкм не более $22/0,1\text{м}^2$;
- число частиц размером 500 мкм не более $0,69/0,1\text{м}^2$;
- число частиц размером 750 мкм не более $0,09/0,1\text{м}^2$.

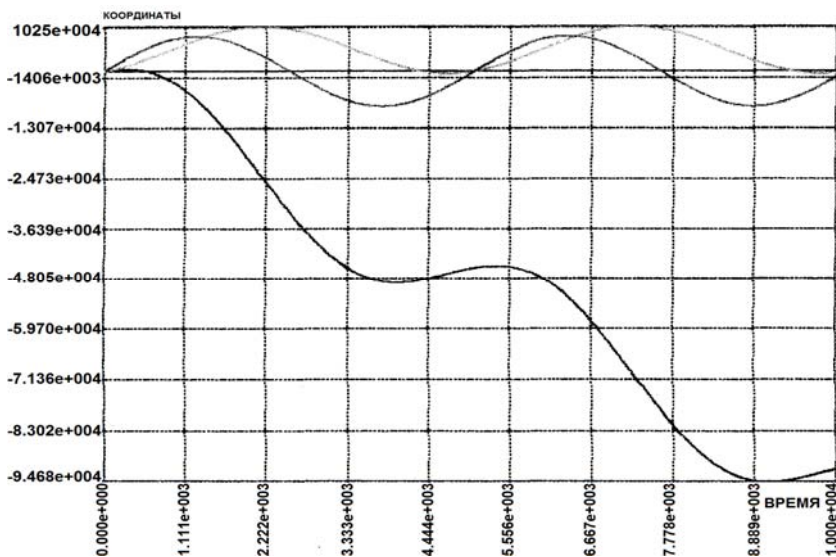


Рис. 5.13. Зависимость координат x, y, z частицы от времени при начальных значениях компонент вектора скорости

$$v_x = 5 \text{ м/с}, v_y = v_z = 0$$

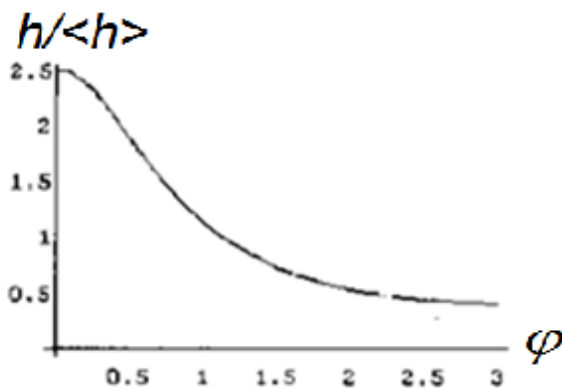


Рис. 5.14. Зависимость отношения локальной толщины молекулярного покрытия h к средней толщине покрытия $\langle h \rangle$ от угла φ

5.7 Уравнения движения заряда в поле

Заряд, находящийся в поле, не только подвергается воздействию со стороны поля, но в свою очередь сам влияет на поле, изменяя его. Однако если заряд не велик, то его действием на поле можно пренебречь. В этом случае, рассматривая движение в заданном поле, можно считать, что само поле не зависит ни от координат, ни от скорости заряда.

Уравнения движения заряда в электромагнитном поле получаются варьированием действия, т.е. даются уравнениями Лагранжа. Ограничимся нерелятивистским случаем, когда скорость заряда много меньше скорости света.

Тогда уравнение движения заряда запишется в виде

$$m \frac{dv}{dt} = qE + q[vB],$$

где m – масса заряженной частицы;

q – ее заряд;

v – скорость;

E – напряженность электрического поля;

B – индукция магнитного поля.

Кроме того, движение частицы происходит в гравитационном поле Земли. Это поле является центральным:

$$\vec{F} = -\frac{\partial U(r)}{\partial r} = -\frac{dU}{dr} \frac{\vec{r}}{r},$$

где \vec{F} – сила, действующая на частицу, по абсолютной величине зависит только от r и направлена в каждой точке вдоль радиуса-вектора.

С учетом гравитационных сил уравнение движения частицы запишется в виде

$$m \frac{dv}{dt} = \gamma \frac{mM}{r^2} \frac{\bar{r}}{r} + q\bar{E} + q[v\bar{B}],$$

где γ – гравитационная постоянная, M – масса Земли.

Решая уравнения движения частиц в окрестности КА, можно определить потоки заряженных частиц, падающие на поверхность КА. Зная заряды, которые несут на себе частицы, можно определить суммарный заряд, наводимый потоками частиц, на поверхность элементов конструкции КА.

На рис. 5.15 представлено распределение частиц по поверхности КА «Фотон». Белый цвет соответствует чистой поверхности. Чем темнее цвет элемента, тем больше плотность частиц на нем.

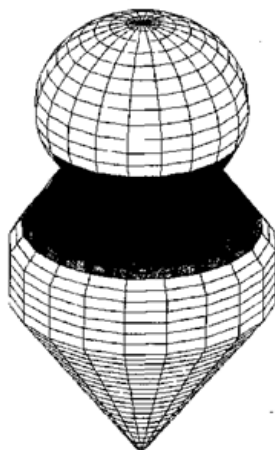


Рис. 5.15. Распределение частиц по поверхности КА «Фотон»

На рис. 5.16 и 5.17 представлены примеры распределения конденсата по поверхности КА

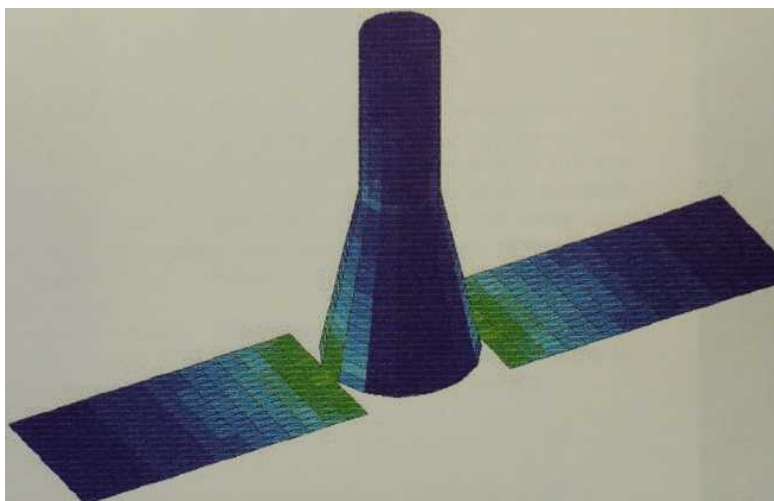


Рис.5.16.Распределение конденсата по поверхности КА
через 50 часов эксплуатации

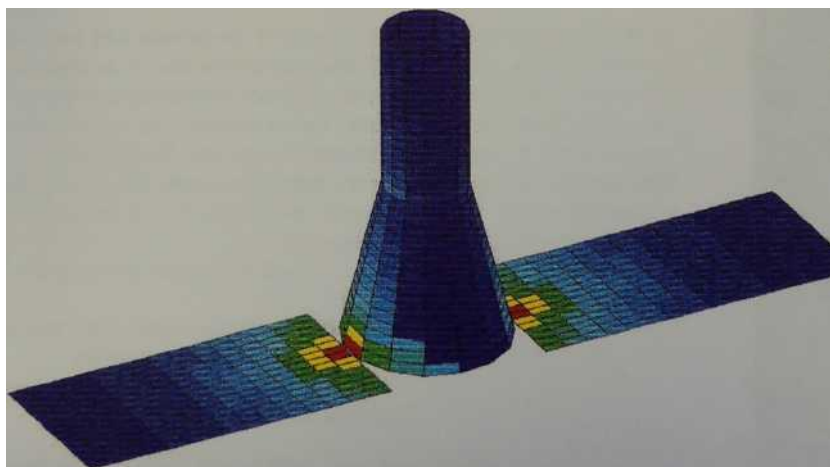


Рис. 5.17. Распределение конденсата по поверхности КА
через 500 часов эксплуатации

6 ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ

6.1 Основные принципы масс-спектрометрии

Масс-спектрометрия является аналитическим методом, который используется для точного измерения молекулярных и атомных масс анализируемого вещества путем ионизации частиц этого вещества. Зачастую на основе измеренных данных также могут быть получены сведения о молекулярной структуре вещества. Масс-спектрометрия также часто используется для получения количественной информации об относительном составе исследуемого вещества. К тому же масс-спектрометрия может использоваться для множества других исследований, к примеру: скорости протекания химических реакций, изучения энергии ионизации химических соединений и других задач. Таким образом, масс-спектрометрия является одним из наиболее универсальных и всеобъемлющих аналитических методов в распоряжении таких областей науки, как химия и биохимия, фармацевтика, геология, космохимия, ядерная физика, материаловедение, археология, экология и других.

Масс-спектрометрические измерения происходят с использованием ионизированной формы вещества, поскольку, в отличие от нейтральной формы, заряженными частицами легко управлять при помощи электрических или магнитных полей. Можно выделить три основных шага при масс-спектрометрическом измерении:

- 1 – ионизация. На этом шаге вне зависимости от состояния вещества-аналита необходимо получить ионизированный газ;
- 2 – сепарация молекул в зависимости от их массы;
- 3 – регистрация ионного тока разделенных по массам ионов.

Основным принципом работы времяпролетного масс-спектрометра [116, 117, 118] является измерение времени, которое требуется иону для того, чтобы преодолеть расстояние от источника ионов до детектора. В идеальном случае все ионы имеют одну и ту же кинетическую энергию, приобретенную на участке ускорения. Но ввиду разного соотношения массы к заряду они имеют разные скорости. Так как ионы на своем пути преодолевают бесполевого участок, они разделяются на группы или пакеты в соответствии с их скоростью, которая является функцией отношения массы к заряду. Далее эти ионные пакеты регистрируются и на основе данных времени пролета этих пакетов можно рассчитать их отношение массы к заряду. Особенностью такого вида разделения ионов является отсутствие верхнего предела отношения массы к заряду. Наиболее простым примером прибора такого типа может являться линейный масс-спектрометр, схема которого изображена на рис. 6.1 [119].

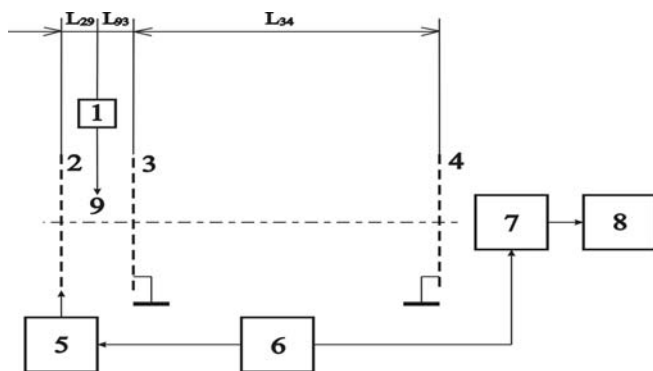


Рис. 6.1. Структурная схема времяпролётного масс-спектрометра:
 1 – источник электронов; 2 – выталкивающая сетка;
 3, 4 – заземлённые сетки; 5 – источник выталкивающих импульсов;
 6 – управляющее устройство; 7 – приёмник ионов;
 8 – блок регистрации спектров; 9 – пространство ионизации

Кинетическая энергия, полученная ионами при ускорении, равна потенциальной энергии электрического поля между ускоряющими сетками:

$$qU = \frac{mV^2}{2}. \quad (6.1.1)$$

Поскольку невозможно измерить скорость иона непосредственно, измеряется время пролета бесполевого пространства L . Таким образом, время пролета равно:

$$t_{\text{пр}} = \frac{L}{V} = L \sqrt{\frac{m}{2q \cdot U}}. \quad (6.1.2)$$

Измеренные времена пролета всех ионов превращаются во временной спектр, который можно преобразовать в массовый спектр путем калибровки прибора. Обычно в качестве калибровочного уравнения выступает следующее [117, 118, 120]:

$$\sqrt{\frac{m}{q}} = at + b, \quad (6.1.3)$$

где a – коэффициент пропорциональности между соотношением m/q и временем пролета;

b – временной сдвиг, возникающий из-за разницы между выталкивающим импульсом и импульсом начала записи массового спектра.

Обе константы в выражении (6.1.3) однозначно определяются при снятии массового спектра двух различных веществ с заранее известной атомной или молекулярной массой.

Исходя из выражений (6.1.1), (6.1.2), можно записать следующее выражение:

$$\frac{m}{q} = \left(\frac{2q \cdot U}{L^2} \right) t^2. \quad (6.1.4)$$

Отсюда следует:

$$\frac{1}{q} dm = \left(\frac{2q \cdot U}{L^2} \right) 2t dt. \quad (6.1.5)$$

Из (6.1.4) и (6.1.5) можно записать следующее выражение для разрешения прибора [117, 121, 122, 123]:

$$R = \frac{m}{\Delta m} = \frac{t}{2\Delta t}. \quad (6.1.6)$$

Различают определения разрешающей способности по 10% долине между массовыми пиками либо по ширине пика на половине уровня, что поясняется рис. 6.2.

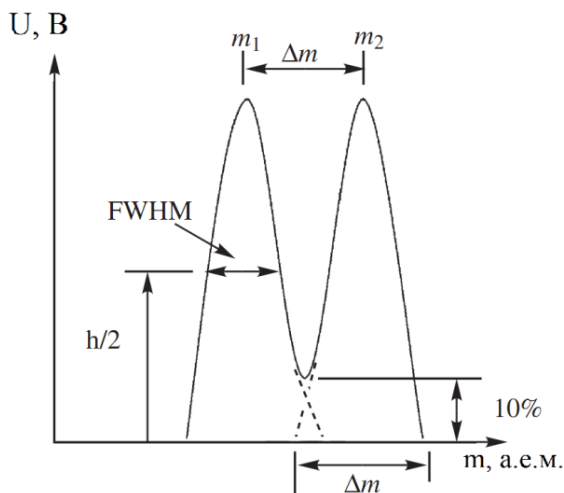


Рис. 6.2. Разрешающая способность 10%-определения и FWHM-определения

6.2 Основные характеристики масс-спектрометров

Характеристики масс-спектрометров в значительной мере зависят от конструкции масс-анализатора и его ионной оптики. Масс-анализатор при этом выполняет две функции:

- диспергирует ионы в соответствии с их отношением массы к заряду;

- фокусирует ионы в точке фокусировки.

Можно выделить следующие характеристики масс-спектрометров [117]:

- массовый диапазон – максимальное допустимое соотношение массы к заряду;
- разрешение – возможность различить два соседних массовых пика;
- массовая точность – ошибка измерения отношения массы к заряду;
- коэффициент сбора – отношение ионов, попавших в приемник, к общему количеству ионов;
- динамический диапазон – диапазон, в котором высота массового пика линейно зависит от концентрации вещества-аналита;
- скорость – количество массовых спектров в секунду или время, затраченное на снятие одного массового спектра;
- чувствительность – минимальное количество вещества-аналита, которое может быть зарегистрировано прибором;
- гибкость – возможность применения других ионных источников, детекторов, регистрирующих устройств.
- массогабаритные и энергетические характеристики важны при использовании на борту или в мобильных приложениях.

6.3 Требования, предъявляемые к масс-спектрометрам

В связи с тем что методы масс-спектрометрии широко применяются в различных областях науки и техники для изучения элементного состава газов, твердых веществ, изучения быстропротекающих химических процессов, можно выделить следующие общие требования к масс-спектрометрам [117, 124]:

- высокая разрешающая способность прибора, которая требуется для точного определения элементного состава и обеспечивается за счет точности изготовления конструкции масс-спектрометра и настройки электроники ($R > 250$ для элементного анализа);
- высокая чувствительность обеспечивается за счет применения оптических систем с фокусировкой ионов (давление $\sim 10^{-13}$ торр);
- высокое быстродействие и возможность регистрации однократных процессов обеспечиваются за счет применения прибора времяпролетного типа (время одного измерения ~ 100 нс);
- высокая точность обеспечивается за счет надежной тарировки прибора при помощи точной математической модели масс-спектрометрического преобразователя, описывающей связи выходных сигналов преобразователя с физическими параметрами вещества-аналита;
- надежность обеспечивается резервированием и экранированием всех важных элементов устройства (двух-, трехкратное резервирование).

6.4 Области применения масс-спектрометрии

Масс-спектрометрия применяется практически во всех областях науки. Это объясняется высоким уровнем характеристик современных приборов и широким спектром способов ионизации, которые подходят для любого класса анализируемых веществ [116, 117, 122, 125, 126].

Основными областями применения являются:

Физика:

- а) определение атомных масс элементов;
- б) определение концентраций изотопов;
- в) определение степеней ионизации.

Химия:

- а) измерение молекулярных масс соединений;

- б) структурный анализ органических соединений;
- в) количественный анализ неорганических и органических соединений;

г) ионные измерения в ионной химии газов.

Геология и космология:

а) определение возраста и состава горных пород и других геологических объектов;

б) определение химического состава микрометеоритов, частиц космического мусора, элементного состава собственной внешней атмосферы космических аппаратов, хвостов комет.

Экология:

а) анализ загрязнений окружающей среды в воздухе, воде и почве;

б) изучение состава земной атмосферы и водных ресурсов: озер, рек, морей, океанов.

Медицина:

а) измерение молекулярной массы тяжелых биологических соединений;

б) одновременная сепарация и детектирование сложных смесей биологических соединений;

в) количественный анализ различных соединений в биологических тканях и жидкостях;

г) идентификация болезней;

д) клинические исследования;

е) профайлинг бактерий и вирусов.

Фармацевтика:

а) изучение химического состава синтезированных соединений;

б) фармакодинамические и фармакокинетические исследования новых и старых препаратов.

Промышленность:

а) мониторинг окружающей среды на предприятиях;

б) мониторинг состава продукта в нефтехимической и газохимической промышленности.

Материаловедение:

а) анализ металлов, полупроводников, полимеров и т.п.

Другие области:

- а) поиск взрывчатых веществ;
- б) поиск запрещенных веществ;
- в) допинг-контроль.

6.5 Источники ионизации газообразных и твердых веществ

6.5.1 Ионизация электронным ударом

Электронная ионизация – один из старейших методов ионизации, применяемый с 1918 г. [127, 128, 129]. Это наиболее популярный метод ионизации органических и неорганических веществ с молекулярной массой менее 600 а.е.м. Однако ограничением этого метода является то, что он применим только для анализа термически стабильных и достаточно летучих веществ.

Схематически ионный источник с ионизацией электронным ударом изображен на рис. 6.3.

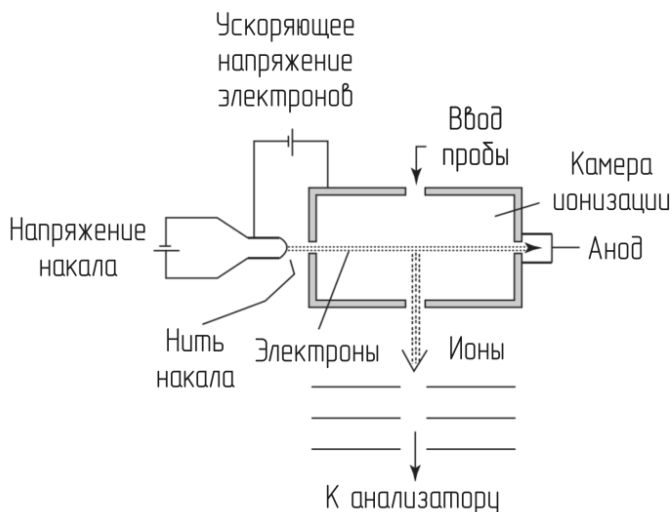
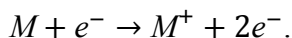


Рис. 6.3. Ионный источник с ионизацией электронным ударом

Реакция ионизации описывается уравнением [117]



Если энергия электронов превышает потенциал ионизации молекул вещества, внешние атомы или молекулы отрываются от ядра, что приводит к образованию положительно заряженного иона. Обычно применяются пучки с энергией электронов, равной 70 эВ. Поскольку энергия электронов достаточно высока, кроме однократно заряженных могут также образовываться многократно заряженные ионы, а также может происходить фрагментация молекул либо диссоциативная ионизация.

6.5.2 Химическая ионизация

Химическая ионизация – это относительно низкоэнергетический способ ионизации. Следовательно, он подходит для соединений, у которых сложно получить нефрагментированные молекулярные ионы.

Основным отличием этого способа ионизации от ионизации электронным ударом является то, что ионизация происходит путем реакции кислота-основание в газовой фазе.

Рассмотрим три шага, которые приводят к химической ионизации. На первом шаге реагент, парциальное давление которого в 10-100 раз выше, чем давление вещества-аналита, ионизируется при давлении 0,1-1 торр электронным пучком энергии 200-500 эВ. На втором шаге в результате ионно-молекулярных реакций образуются стабильные молекулярные ионы вещества-реагента. На последнем шаге происходит непосредственная ионизация молекул вещества-аналита путем ионно-молекулярных реакций с молекулярными ионами вещества-реагента посредством протонного переноса или формирования аддуктов [117, 120, 121]. В качестве вещества-реагента применяют, например, метан, изобутан, мышьяк.

6.5.3 Фотоионизация

Конструкция источника ионов с фотоионизацией похожа на конструкцию источника с электронным ударом за исключением того, что вместо электронного пучка используется пучок фотонов. Для ионизации большинства органических соединений необходима энергия от 8 до 10 эВ [117, 130]. При этом происходит отрыв электрона с внешней электронной оболочки. Таким образом, в качестве источника фотонов обычно применяют вакуумные ультрафиолетовые источники, такие как: дейтериевая лампа, эксилампа или 118-нм Nd:YAG- лазер.

Благодаря большому сечению ионизации органических молекул в ультрафиолетовой области, фотоионизация является высокоэффективным методом ионизации.

Важным требованием к веществу-аналиту при фотоионизации является его присутствие в газообразной фазе. Твердые образцы должны быть переведены в газовую фазу путем лазерной десорбции либо термического испарения.

6.5.4 Десорбция электрическим полем

В этом методе анализа конденсированных веществ основную роль играет подготовка вещества, которая заключается в осаждении анализируемого вещества на вольфрамовой подложке, покрытой углеродными нанотрубками, путем испарения раствора, содержащего соль [117, 121]. Далее на эту подложку относительно другого электрода подается напряжение, обеспечивающее напряженность поля до 10^8 В/см. Подложка при этом нагревается до плавления образца. Ионизация возникает в конденсированной фазе за счет квантового туннелирования. Далее ионы мигрируют на кончики углеродных нанотрубок, где происходит их десорбция.

Внешний вид подготовленной нити из вольфрама показан на рис. 6.4.

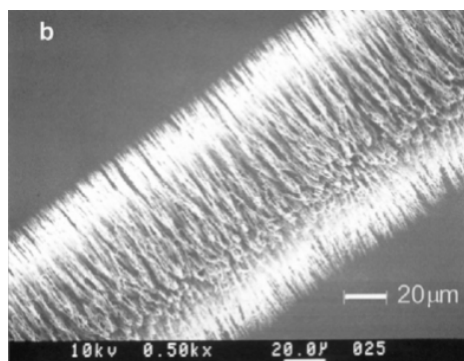


Рис. 6.4. Внешний вид подготовленной нити из вольфрама

Этот метод ионизации производит ионы с крайне низкой потенциальной энергией, ввиду этого практически полностью отсутствует фрагментация.

6.5.5 Лазерная десорбция/ионизация

Лазерная десорбция – это эффективный метод получения ионов в газовой фазе. Для этого используются лазеры с потоком мощности порядка 10^6 - 10^9 Вт/см², которые фокусируются на площадках площадью 10^{-3} - 10^{-4} см² [117, 120, 121, 131].

Эти лазерные импульсы удаляют материал с поверхности и образуют микроскопическое облако плазмы, состоящее из ионов и нейтральных молекул, которые могут реагировать между собой вблизи поверхности образца. В этом случае лазерный импульс производит как испарение, так и ионизацию образца.

Этот метод используется при изучении поверхностей и локального состава образцов, например, включений в минералах или в органеллах клеток.

Обычно этот метод позволяет обеспечивать селективную ионизацию путем подстройки лазера. Поскольку сигналы очень кратковременны, необходимо применение масс-анализаторов, способных регистрировать однократные события, например, времяпролетных масс-спектрометров.

6.5.6 Матрично-активированная лазерная десорбция/ионизация (MALDI)

MALDI состоит из двух шагов. На первом шаге соединение, которое требуется проанализировать, растворяется в веществе, содержащем маленькие органические молекулы, называемые матрицей и обладающие хорошей адсорбцией на длине волны лазера. Эта смесь высушивается, в результате чего получается твердый раствор вещества-аналита в веществе-матрице. При этом считается, что молекулы вещества-аналита со всех сторон окружены молекулами вещества-матрицы и не взаимодействуют друг с другом.

Второй шаг происходит в вакуумной камере источника внутри масс-спектрометра. При воздействии лазерного импульса на матрицу происходит абляция небольших порций матрицы и вещества-аналита. Точный механизм ионизации при этом до конца не изучен, однако наиболее распространенной является версия об ионизации протонным переносом в газовой и/или конденсированной фазе.

Схематичное изображение процесса матрично-активированной десорбции/ионизации представлено на рис. 6.5.

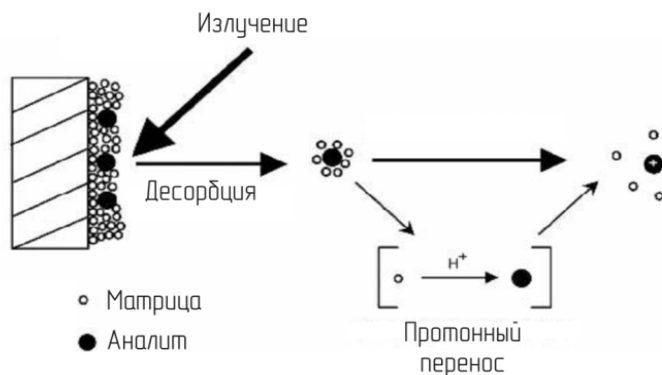


Рис.6.5. Процесс матрично-активированной десорбции/ионизации

К преимуществам MALDI относят [117, 120, 121]:

- наибольшую чувствительность по сравнению с другими методами с лазерной ионизацией;
- универсальность, поскольку не требуется подстраивать длину волны лазера на максимум адсорбции вещества-аналита, т.к. именно матрица поглощает лазерный импульс;
- минимизация повреждений образца, поскольку лазерное излучение поглощается веществом-матрицей;
- возможность анализа веществ с очень большой молекулярной массой в очень малых количествах.

6.6 Существующие в настоящее время масс-спектрометры времяпролетного типа

6.6.1 Времяпролетные масс-спектрометры с ионизацией электронным ударом

В настоящее время для увеличения разрешающей способности применяют высокие амплитуды ускоряющих напряжений, а также увеличивают длину пробега в бесполовых участках. Такие требования, однако, не всегда удается выполнить ввиду ограничений, накладываемых на массу и габариты приборов, а также на величину их энергопотребления. Ведь с ростом ускоряющего напряжения увеличивается скорость ионов, что влечет за собой необходимость применения высокоскоростной электроники, способной захватывать и обрабатывать спектры масс с очень высокой скоростью.

Проблема увеличения бесполового пространства с сохранением габаритов прибора может быть решена использованием принципа переотражения ионов и их многократного пробега по одному и тому же бесполовому промежутку. Так, например, в работах [132, 133, 134] ионы на пути от источника к приёмнику

переотражаются два раза, каждый ион при этом проходит бесполовое пространство три раза, и габариты спектрометра можно уменьшить.

При использовании приборов с большим количеством переотражений необходимо учитывать потери ионов при прохождении тракта масс-анализатора. Метод, основанный на большом количестве переотражений, хорош для анализа веществ с высокой концентрацией, но не подходит для исследования вещества в космических экспериментах ввиду малой чувствительности. Также к недостаткам такого прибора можно отнести невозможность компенсации начального энергетического разброса ионов и зависимость разрешающей способности от ширины пучка ионизирующих электронов – энергия иона зависит от координаты его ионизации.

Для решения задачи фокусировки ионов по энергиям с целью улучшения функциональных характеристик времяпролетных масс – спектрометрических преобразователей было предложено использование ионных зеркал специальной формы [135, 136, 137]. Временная фокусировка в таких приборах осуществляется следующим образом: ионам с большей энергией соответствует большая длина пробега в ионном зеркале, за счет чего компенсируется разница во времени пролета бесполового участка траектории. Такие приборы относятся к типу приборов с отражением ионов, в них ионы замедляются до полной остановки и траектория разворачивается [121], также существуют приборы с отклонением ионов, в них траектория только отклоняется и энергия ионов изменяется незначительно [138].

Для более точной фокусировки ионов, вытянутых из протяженной области ионизации, был разработан прибор с применением ионного источника специальной формы с двумя ускоряющими промежутками и ионного зеркала с двумя отражающими промежутками [139, 140, 141]. Схема такого масс-спектрометра показана на рис. 6.6.

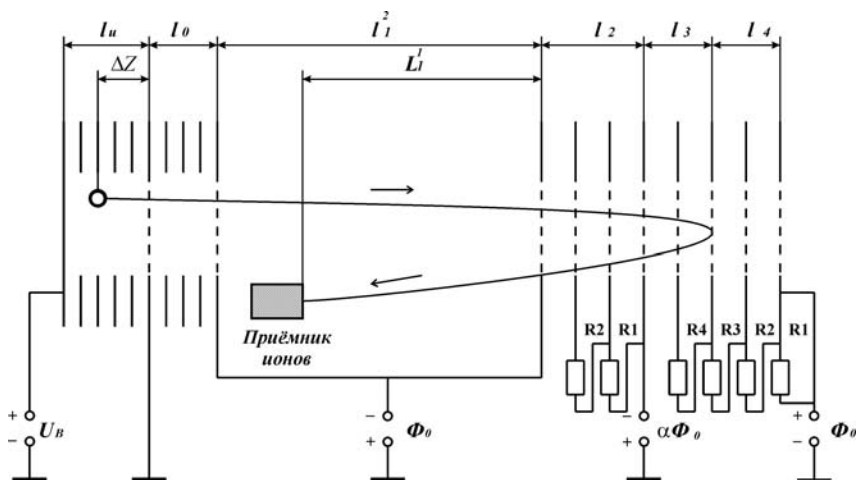


Рис. 6.6. Структурная схема времяпролётного масс-спектрометра с ионным зеркалом: l_u – пространство ионизации; l_0 – выталкивающий промежуток; $l_2 - l_4$ – отражающее зеркало; l_1^2, l_1^1 – бесполевого пространство

Выражение для суммарного времени пролета запишется в виде[141]:

$$\begin{aligned}
 t = & \sqrt{\frac{m}{2q}} \left[\frac{2}{E_H} \left(\sqrt{\Delta\Phi_T + \Delta\Phi_X} \pm \sqrt{\Delta\Phi_T} \right) + \right. \\
 & + \frac{2}{E_0} \left(\sqrt{\Delta\Phi_T + \Delta\Phi_X + \Delta\Phi_0} - \sqrt{\Delta\Phi_T + \Delta\Phi_X} \right) + \\
 & + \frac{l_1}{\sqrt{\Delta\Phi_T + \Delta\Phi_X + \Delta\Phi_0}} + \frac{4l_2}{(1-\infty)\Phi_0} \left(\sqrt{\Delta\Phi_T + \Delta\Phi_X + \Delta\Phi_0} - \right. \\
 & - \sqrt{\Delta\Phi_T + \Delta\Phi_X + \infty\Phi_0} \left. \right) + \frac{4l_3}{\infty\Phi_0} \left(\sqrt{\Delta\Phi_T + \Delta\Phi_X + \infty\Phi_0} - \right. \\
 & \left. - \sqrt{\Delta\Phi_T + \Delta\Phi_X} \right) \left. \right] + t_{\text{опр}},
 \end{aligned} \quad (6.6.1)$$

где Φ_0 – выталкивающее напряжение;

q – заряд иона;
 m – масса иона;
 $\Delta\Phi_T$ – начальный энергетический разброс;
 $\Delta\Phi_X$ – приращение начальной энергии, зависящее от начальной координаты иона в области ионизации;
 α – коэффициент, $\alpha = \Phi_1/\Phi_0$;
 Φ_1 – напряжение сетки в ионном зеркале;
 $t_{\text{отр}}$ – время пролета ионов в зоне отражения;
 l_1 – длина бесполевого участка.

Наличие ионного зеркала обеспечивает двукратное использование бесполевого участка траектории и способствует фокусировке ионных пакетов по энергии, что в какой-то мере исключает влияние начального энергетического разброса.

Описываемый масс-спектрометр имел следующие характеристики: длина бесполевого участка 1 м, ускоряющее напряжение 250 В.

Согласно расчётам [141] определены зависимости недокомпенсации временного разброса от начальной энергии ионов (координаты ионизации), приведенные на рис. 6.7.

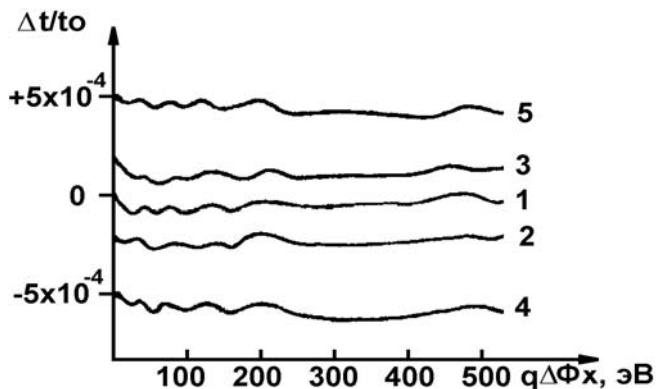


Рис. 6.7. Зависимость недокомпенсации временного разброса от начальной энергии ионов (координаты ионизации), $q\Delta\Phi_T = 0$ (1), $\pm 0,1$ (2, 3), ± 1 эВ (4, 5)

Из рис.6.7, принимая во внимание базовое время пролета в 61,2 мкс, можно сделать вывод о разрешающей способности прибора порядка 3500 единиц для случая без начального энергетического разброса и порядка 1000 и 500 единиц для случаев с разбросом в 0,1 и 1 эВ соответственно.

Авторами работ [142, 143, 144] для фокусировки ионных пакетов по энергиям было разработано ионное зеркало, содержащее три сетки, которые можно рассматривать как два плоских конденсатора с однородными полями. Первая сетка при этом заземлена и ограничивает бесполевое пространство. Первая и вторая, а также вторая и третья сетки, расположенные на расстояниях d_1 и d_2 под напряжениями V_1 и V_2 , образуют два плоских конденсатора (рис. 6.8).

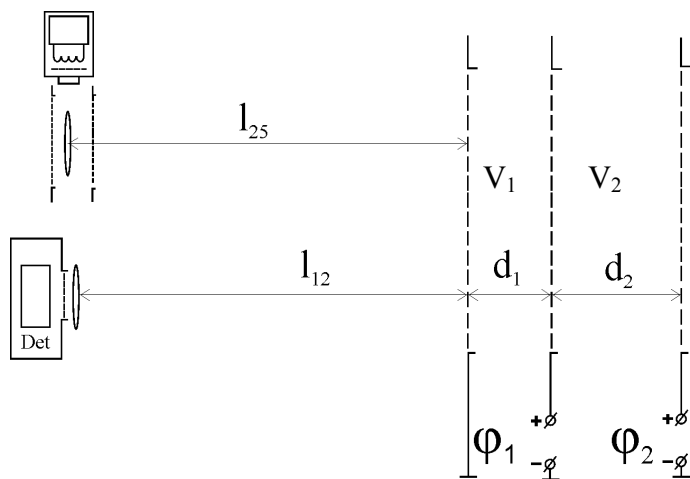


Рис. 6.8. Схема ионно-оптической системы с фокусировкой по энергии второго порядка

Условие фокусировки ионов выглядит следующим образом [28, 30]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{dt}{dV} \right)_{V=V_0} = 0; \\ \left(\frac{d^2t}{dV^2} \right)_{V=V_0} = 0, \end{array} \right. \quad (6.6.2)$$

где t – суммарное время пролёта.

Система (6.6.2) соответствует условию фокусировки второго порядка, т.е. независимости времени пролёта и его производной от начального энергетического разброса ионов в окрестности нулевого разброса.

Если все ионы будут отражаться в промежутке d_1 , можно переписать условие фокусировки (6.6.2) [139, 143]:

$$\frac{L}{2V_0} = \frac{2d_1}{V_1}, \quad (6.6.3)$$

где L – длина бесполевого участка траектории.

Из уравнения (6.6.3) можно сделать вывод о нецелесообразности применения одного замедляющего промежутка, поскольку требуется слишком большая длина промежутка d_1 . Величину отражающего промежутка можно сократить, разбив его на два участка. Таким образом, ионы будут терять основную часть своей энергии при пролете первого участка торможения, время же пролёта во втором участке можно увеличить, понизив в нем напряженность поля. В этом случае время пролёта промежутка d_2 является достаточным для компенсации начального энергетического разброса ионов до 10%.

Так, для приведенного прибора с длиной бесполевого участка в 0,7 м и ускоряющим потенциалом, равным 500 В, получена разрешающая способность порядка 4000 единиц для разброса в 10% и 10000 единиц для разброса в 3% от ускоряющего напряжения.

С ростом количества замедляющих промежутков растет порядок фокусировки энергетического разброса и в предельном случае возможна компенсация 100% энергетического разброса ионов.

Существует также теоретическая возможность создания приборов, исключая необходимость применения бесполевого участка, однако структура нелинейного поля в этом случае должна быть строго квадратичной, что сложно с точки зрения физической реализации.

Одним из способов повышения разрешающей способности во времяпролетных приборах также является использование систем ортогонального ввода ионов в ускоряющий промежуток. Это позволяет отсеять ионы с высокими осевыми скоростями и соответственно упростить задачу фокусировки по энергиям. Авторы работы [146] предлагают миниатюрный масс-спектрометр с ионизацией электронным ударом и ортогональным вводом посредством квадрупольного фильтра масс, что позволяет дополнительно сепарировать ионы вещества-аналита до ускорения. Прибор изображен на рис. 6.9.

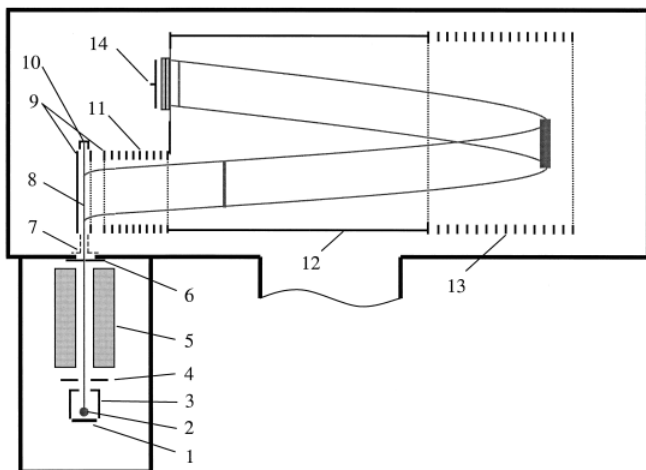


Рис.6.9. Времяпролетный масс-спектрометр с ортогональным вводом ионов: 1-3 – ионный источник; 4 – фокусирующая линза; 5 – квадрупольный массовый фильтр; 6 – апертура; 7 – отклоняющие пластины; 8 – участок накопления ионов; 10 – коллектор ионов; 9, 11 – ускоряющая система; 12 – бесполевого пространства, 13 – рефлектрон; 14 – приемник

Прибор имеет длину бесполевого участка 0,4 м, ускоряющее напряжение порядка нескольких кВ. Разрешение, показанное прибором, составляет порядка 1500 единиц для $m/z = 25$ и порядка 5000 единиц для $m/z = 264$. Рост разрешения авторы объясняют ростом времени пролета ионов с увеличением массы.

Плюсом данного прибора является возможность накопления ионов в тракте до ускоряющего промежутка и предварительная сепарация ионов по энергиям и массам, обеспечивающая повышение разрешающей способности. Однако у такого способа анализа присутствует также ряд недостатков – невозможность единомоментной записи всего массового спектра (необходимость сканирования диапазона), а также необходимость накопления ионов – ввиду отсечки ионов в результате ортогонального ввода.

С целью повышения разрешающей способности приборов предлагаются конструкции с использованием изменяемых во времени электрических полей. Одним из вариантов подобных конструкций является использование источников ионов со сложной формой выталкивающего импульса [147] (рис. 6.10), причем данный способ может применяться и в случае с лазерной ионизацией пробы [148]. В этом случае форма импульса подбирается таким образом, чтобы происходила наиболее эффективная фокусировка одной массы, другие массы в этом случае либо фокусируются хуже, либо вообще отсеиваются, в этом случае речь идет о масс-сепараторе.

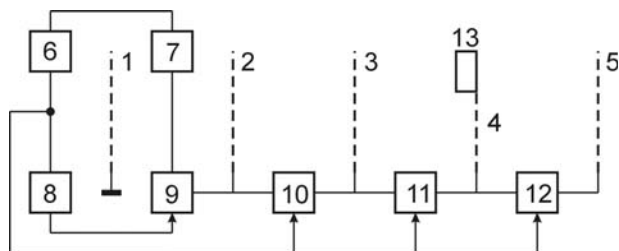


Рис. 6.10. Времяпролётный масс-спектрометр:
 1-5 – сетки; 6 – источник управляющих импульсов; 7- источник ионов;
 8 – блок задержки; 9,10,11,12 – источники знакопеременных
 импульсных потенциалов; 13 – детектор

Динамическое электрическое поле описывается следующим выражением [147]:

$$E(t) = \begin{cases} \frac{m_0}{q} \cdot \frac{TL_{34}}{t_0(T-t_0)^2}, & 0 \leq t \leq t_0; \\ \frac{m_0}{q} \cdot \frac{TL_{34}}{t(T-t)^2}, & t_0 \leq t \leq T, \end{cases} \quad (6.6.4)$$

где m_0 – масса частицы (атом, молекула) выделяемой компоненты газа;

q – заряд иона;

L_{34} – длина бесполевого участка;

T – время прилёта выбранной массы в детектор;

t_0 – время, в течение которого ускоряющее поле статично (обычно $t_0 \approx T/10$).

Форма управляющих напряжений изображена на рис. 6.11.

Принцип работы устройства основан на сепарации массовых пиков. Источники 9-12 генерируют напряжения U_s , U_d , U_{L01} и U_{L12} соответственно таким образом, что ионы, вылетевшие раньше выделяемой массы, ускоряются более высоким напряжением, чем выделяемая масса, а ионы, вылетевшие позже выделяемой массы – более низким напряжением. Так достигается эффект «растягивания» временной оси в окрестностях выделяемой массы и, как следствие, локальное повышение разрешающей способности.

Форма зависимости выталкивающего поля от времени сохраняется неизменной при сохранении геометрии прибора, с ростом массы растет лишь скорость нарастания выталкивающего импульса dU/dt , причем для тяжелых масс крутизна кривой оказывается значительно более высокой. Для масс свыше 500 а.е.м. такую форму кривой зачастую невозможно обеспечить, даже применяя современную элементную базу, таким образом, данный метод фокусировки целесообразен только для исследования легких ионов.

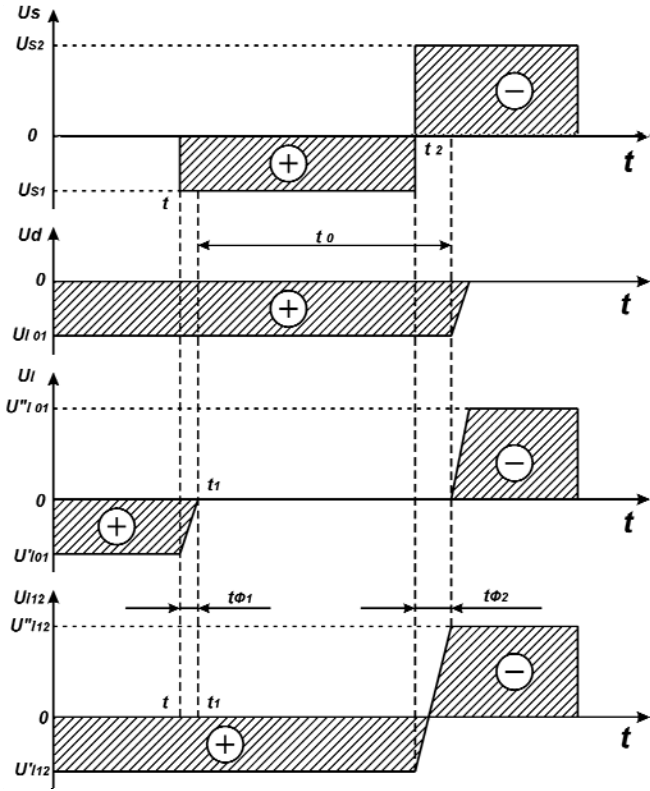


Рис. 6.11. Диаграммы управляющих напряжений:
 \oplus – ускорение ионов; \ominus – замедление ионов

Переменное во времени ускорение $a(t)$ в интервале записывается в виде кусочно-линейной аппроксимации по значениям a_k [149]:

$$a(t) = \begin{cases} a_0 = \frac{eV_0}{m_0 D}, & t \leq 0; \\ a_{k-1} + \frac{a_k - a_{k-1}}{\Delta t} (t - (k-1)\Delta t), & [t \in (k-1)\Delta t, k\Delta t], \end{cases} \quad (6.6.5)$$

где Δt – шаг дискретизации,

a_k – значения мгновенного ускорения, находятся исходя из условия восстановления расчетных скоростей $V_1(t_1)$ при вылете ионов в моменты $t_1 = k\Delta t$.

Требуемая скорость на выходе из источника ионов запишется как:

$$v_{lk} = -\frac{\sqrt{-a_{t_1}a_{t_2}(2a_{t_1}a_{t_2}k\Delta tT - a_{t_1}a_{t_2}k^2\Delta t^2 + 8a_{t_1}d + 8a_{t_2}d)}}{4(a_{t_1} + a_{t_2})} - \frac{a_{t_1}a_{t_2}T - a_{t_1}a_{t_2}k\Delta t}{4(a_{t_1} + a_{t_2})}. \quad (6.6.6)$$

С другой стороны, управляющая зависимость $a(t)$ должна обеспечить приход иона, стартовавшего в момент t (неизвестный заранее) к границе управляющего промежутка $x = l$ (сетка 3 на рис. 6.8) в момент времени $t_1 = k\Delta t$. Следовательно, ускорение $a(t)$ находится из системы уравнений (в предположении, что при $x = 0$ $V_0 = 0$) вида

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{lk} = \int_t^{t_1} a(t) dt = \int_t^{k\Delta t} a(\tau) d\tau, \\ 1 = \int_t^{t_1} \int_t^{\tau} a(z) dz d\tau = \int_t^{k\Delta t} \int_t^{\tau} a(z) dz d\tau. \end{array} \right. \quad (6.6.7)$$

В этой системе две неизвестные величины: t и $a(t)$. Двойной интеграл в системе (6.10) можно представить в виде

$$\int_t^{t_1} d\tau \int_t^{\tau} a(z) dz = \int_t^{t_1} dz \int_z^{t_1} a(z) d\tau = \int_t^{t_1} (t_1 - z) a(z) dz. \quad (6.6.8)$$

Неизвестные величины a_0, a_1, \dots, a_n , а соответственно и U_0, U_1, \dots, U_k находятся последовательно.

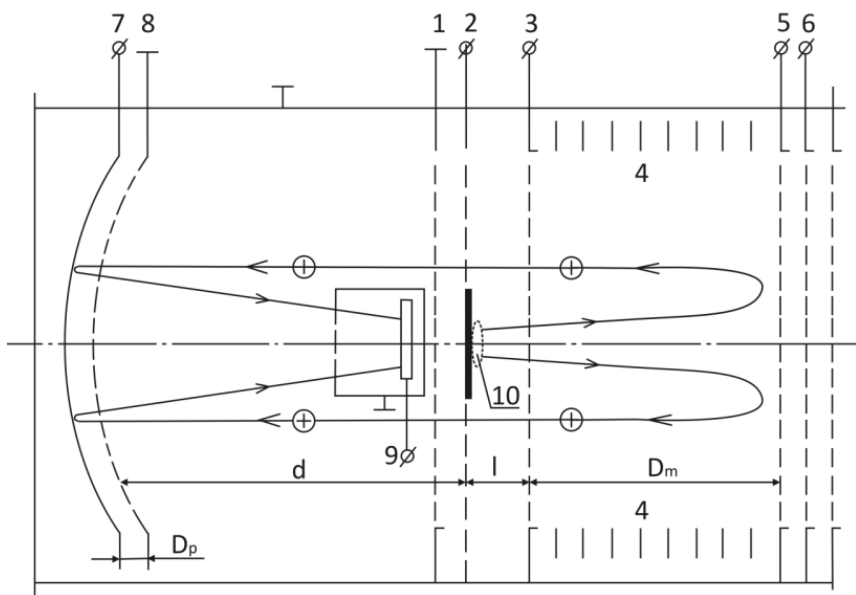


Рис. 6.12 .Времяпролётный масс-спектрометр:

- 1 – сетка, ограничивающая бесполевого пространство;
 2 – сетка с мишенью; 3 – сетка, ограничивающая ускоряющий промежуток; 4 – линейное ионное зеркало; 5, 6 – сетки, ограничивающие линейное зеркало; 7, 8 – параболический отражатель; 9 – приемник ионов; 10 – облако плазмы шириной dx ;
 l – ширина ускоряющего промежутка; D_m – глубина линейного ионного зеркала; d – длина бесполевого участка; D_p – расстояние между электродами параболического отражателя

Ион ускоряется в промежутке между сетками 2 и 3, отражается в линейном зеркале 4, пролетает в обратном направлении через бесполевого пространство между сетками 1 и 8 и, отразившись от параболического отражателя 7-8, попадает в приемник 9 (рис.6.12). Для конструкции прибора с длиной бесполевого участка в 0,25 м и ускоряющим напряжением 300 В преимущество в разрешающей способности на базовой массе 100 а.е.м. составляет 8-9 раз. Разрешающая способность при этом составляет порядка 100 единиц при длительности ионизирующего импульса в 0,1 мкс (рис. 6.13).

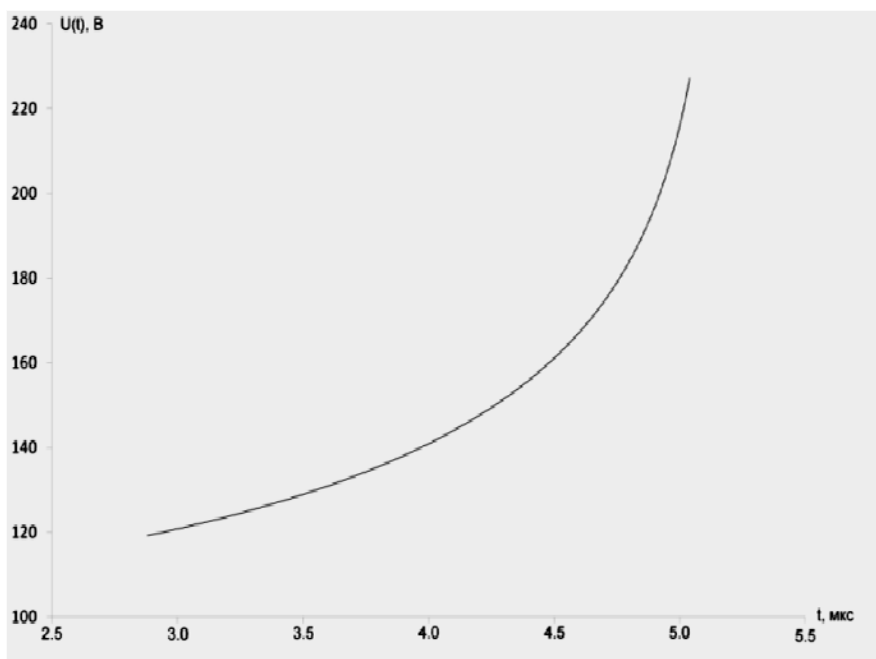


Рис. 6.13. Зависимость выталкивающего напряжения от времени

Другим типом приборов с фокусировкой ионов с использованием динамических электрических полей можно считать приборы с изменяющимся полем за пределами источника ионов. Такие приборы основаны либо на отклонении пучка ионов в определенный момент времени [150], либо на воздействии на осевую составляющую скорости ионов (замедление или реакселерация ионов) [151].

Рассмотрим прибор с отклонением ионов, изображенный на рис. 6.14. Данная конструкция представляет собой время-прямопролетный прибор с сепарацией масс посредством отклонения пучка.

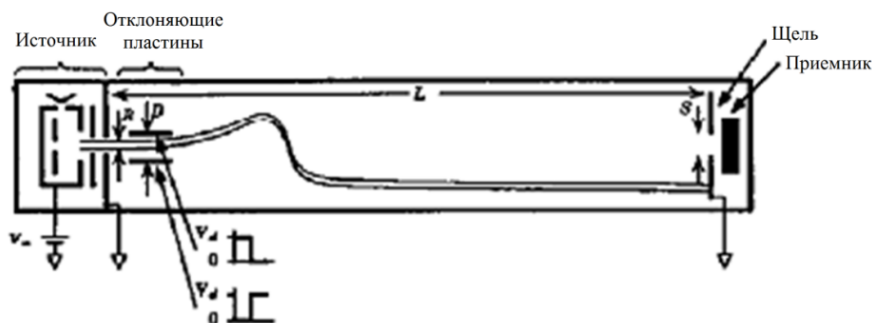


Рис. 6.14. Времяпролётный масс-спектрометр

Прибор с длиной бесполевого участка, составляющей 2,1 м, ускоряющим потенциалом 3 кВ, демонстрирует разрешающую способность порядка 1500 единиц на 219 а.е.м.

Прибор с реакселерацией имеет длину бесполевого участка 0,5 м, ускоряющее напряжение 8 кВ и длину участка реакселерации 0,1 м, показанная им разрешающая способность составляет 10000 единиц в диапазоне от 100 до 1600 а.е.м.

Недостатком двух вышеназванных приборов, наряду с необходимостью применения высоких ускоряющих напряжений, является зависимость формы (либо момента воздействия) динамического электрического поля от выделяемой массы, что приводит к невозможности анализа однократных процессов.

Другим путем повышения разрешающей способности масс-анализаторов является применение схем масс-спектрометров с многократным отражением ионных пакетов либо их циклическим движением по замкнутой траектории.

Так, авторами [152–160] предложена конструкция масс-спектрометра с многократным переотражением пучка ионов, что позволяет многократно увеличить длину пробега заряженных частиц и увеличить разрешающую способность (рис 6.15). При использовании двумерных фокусирующих линз добиваются дополнительной фокусировки пучка и большего количества переотражений. При 78 переотражениях 3%-ном относительном энергетическом разбросе и угловом разбросе в 1 градус путем

численного моделирования было получено разрешение в 50000 для уровня 10% высоты пика. С ростом энергетического разброса разрешение снижается и при 20% составляет около 500.

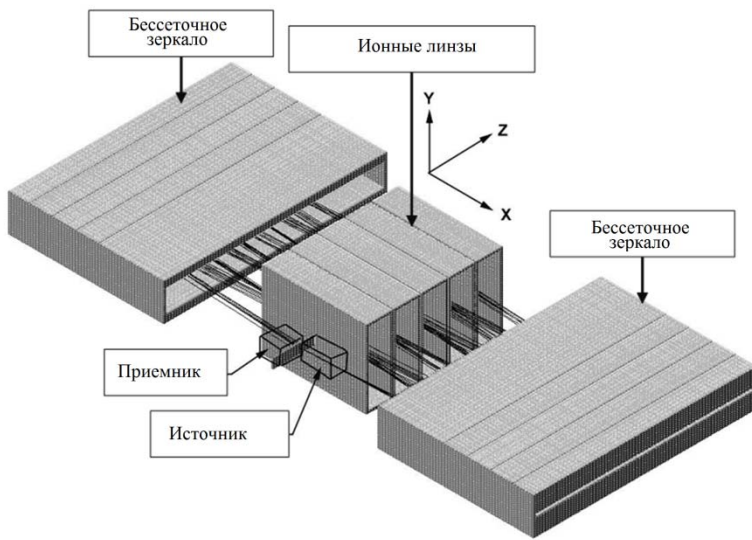


Рис. 6.15. Масс-спектрометр с многократным переотражением

Другим примером многоотражательного прибора (рис. 6.16) может послужить масс-спектрометр MALDI-TOF с тороидальной системой электродов (ТСЭ), разработанный в Токио [161, 162].

Для ускоряющего напряжения порядка 20 кВ и длины пробега ионов порядка 2 м было получено разрешение 30000-70000 для ионов с соотношением m/z от 750 до 2500. Величина разрешения зависела от задержки, которая вводилась между импульсом лазерной ионизации и подачей ускоряющего напряжения. Величина задержки выбиралась от 20 нс до 70 нс. Максимальное разрешение достигалось для ионов с $m/z = 2500$ при задержке в 60 нс.

Зависимость разрешающей способности от массы для различных задержек выталкивающего импульса показана на рис. 6.17.

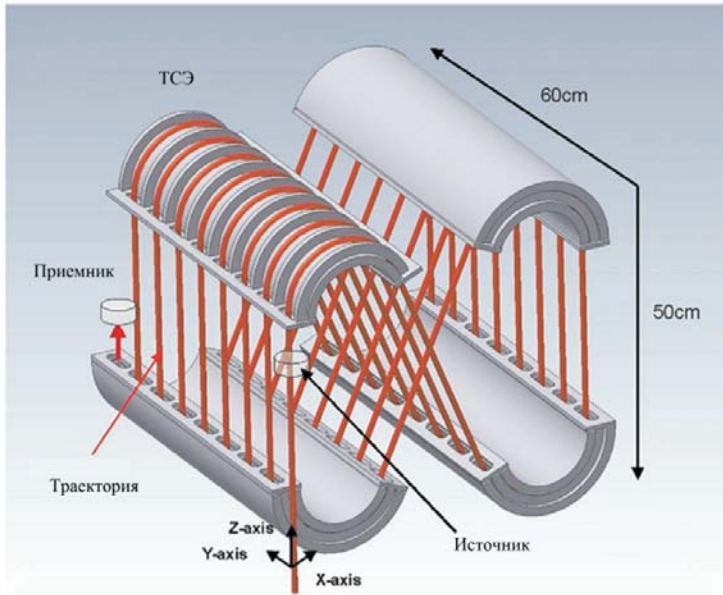


Рис. 6.16. Масс-спектрометр с многократным переотражением

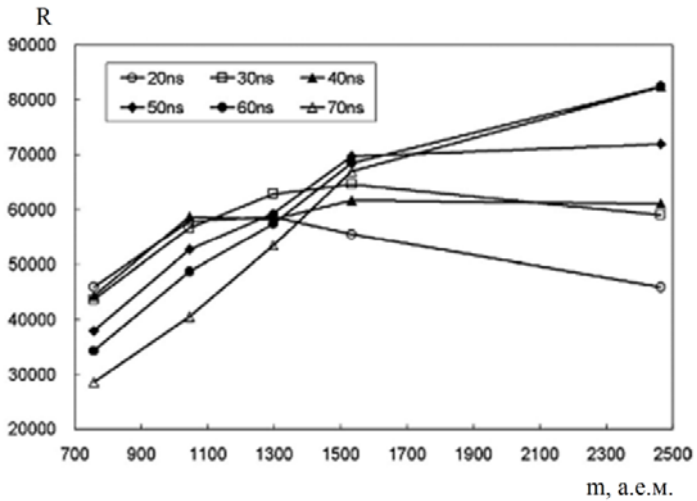


Рис. 6.17. Зависимость разрешающей способности от массы для различных задержек выталкивающего импульса

Прибором подобного типа также является IRIS [163, 164, 165] – циклический масс-спектрометр, схема которого приведена на рис. 6.18.

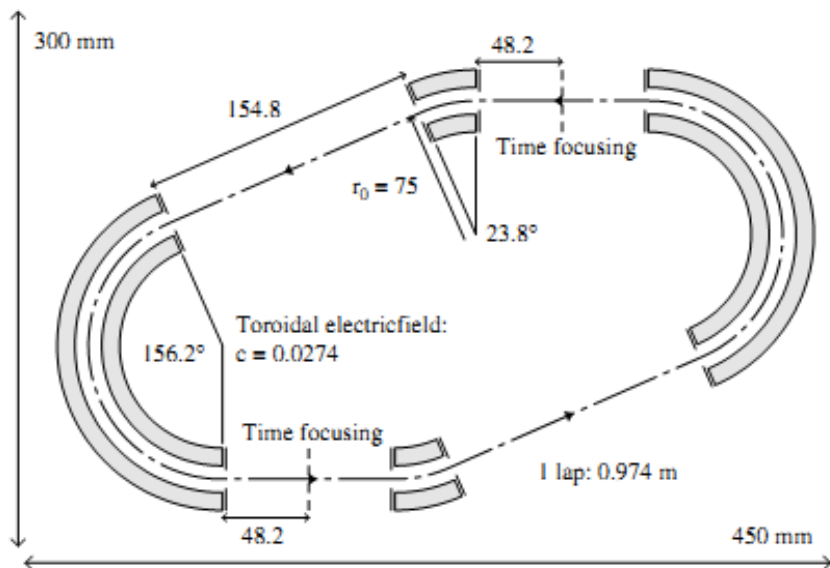


Рис. 6.18. Циклический масс-спектрометр IRIS

Зависимость разрешающей способности и коэффициента пропускания от числа оборотов, пройденных ионами, приведена на рис. 6.19.

Недостатком прибора является наложение спектров, для борьбы с которым необходим предварительный анализ пробы на обычном ВПМС с последующим вычленением интересующих пиков из всего спектра, для чего может быть применен какой-либо прибор, основанный на принципе фильтрации масс, например, квадрупольный масс-спектрометр.

Сравнение характеристик масс-спектрометров приведено в табл. 6.1.

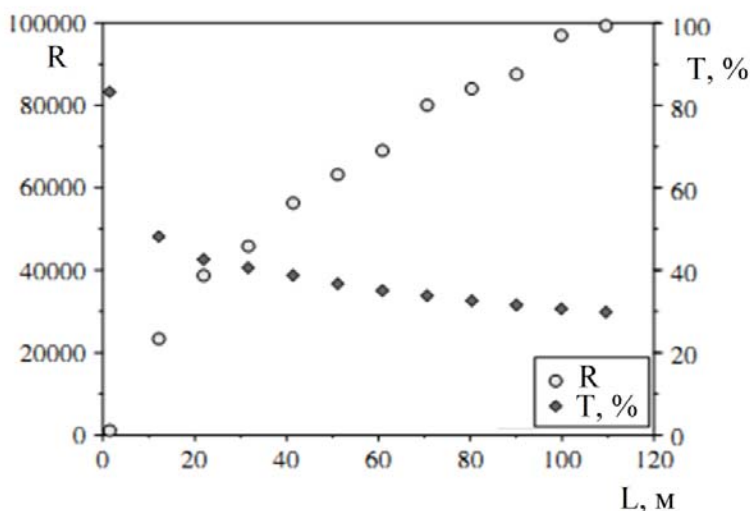


Рис. 6.19. Зависимость разрешающей способности и коэффициента пропускания от длины пути, пройденного ионами

Таблица 6.1. Сравнение масс-спектрометров для анализа газов

Тип прибора	Технические характеристики	Отличительные особенности
Масс-рефлектроны с линейным зеркалом	ЕI Длина бесполевого участка 1 м. Ускоряющее напряжение 250 В. R = 1000 единиц при $\Delta E = 0,1$ эВ, R = 500 единиц при $\Delta E = 1$ эВ	Простота конструкции. Значительное падение разрешающей способности при увеличении энергетического разброса ионов. Зависимость времени пролета от координат ионизации
Рефлектроны с несколькими ускоряющими/отражающими промежутками	ЕI Длина бесполевого участка 0,7 м. Ускоряющее напряжение 500 В.	Фокусировка по энергии второго порядка. Простота конструкции. Недокомпенсация энергетического разброса,

Продолжение табл. 6.19

	<p>R = 4000 единиц при $\Delta E = 50$ эВ, R = 10000 единиц при $\Delta E = 15$ эВ</p>	<p>ограничивающая применимость 10% ускоряющего напряжения</p>
<p>Масс-рефлектроны с ортогональным вводом пробы</p>	<p>EI Длина бесполевого участка 0,4 м Ускоряющее напряжение несколько кВ. R = 1500–5000 единиц при m = 25-264 а.е.м.</p>	<p>Ортогональный ввод пробы с предварительной сепарацией квадрупольным фильтром. Относительно высокая разрешающая способность. Возможность предварительной сепарации ионов. Возможность накопления ионов. Высокое ускоряющее напряжение. Невозможность регистрации однократных процессов. Низкая чувствительность, вызванная отсечкой ионов с высокой осевой скоростью</p>
<p>Приборы на основе изменяющихся во времени электрических полей</p>	<p>EI, MALDI Длина бесполевого участка 0,5 м. Ускоряющее напряжение 8 кВ. R = 10000 единиц при m = 100 – 1600 а.е.м.</p>	<p>Применение динамических секций в виде дополнительных участков ускорения (реакселерации) и торможения ионов или применение отклоняющих систем. Высокая разрешающая способность. Возможность сепарации масс Высокое ускоряющее напряжение.. Сложность генерации ускоряющих импульсов сложной формы.. Невозможность регистрации однократных процессов</p>

Приборы с многократным переотражением	EI, MALDI Длина бесполевого участка 2 м. Ускоряющее напряжение 20 кВ. R =30000-70000 единиц при m = 750-2500 а.е.м.	Применение отложенной экстракции. Возможность варьирования количества переотражения. Возможность работы в циклическом режиме. Высокая разрешающая способность. Высокое ускоряющее напряжение. Низкая чувствительность за счет потерь. Невозможность регистрации однократных событий. Эффект наложения спектров при циклической траектории
---------------------------------------	---	--

Как видно из табл. 6.1, основными путями повышения разрешающей способности на данный момент являются: применение высоких ускоряющих напряжений, импульсов сложной формы либо увеличение длины беспольных участков, а также применение источников и отражателей с полями, обеспечивающими фокусировку по энергии.

Недостатком вышеприведенных способов повышения разрешающей способности является увеличение сложности конструкции приборов и их настройки. Также к недостаткам масс-спектрометрических преобразователей с ионизацией электронным ударом можно отнести невозможность анализа молекулярного состава газов. Для решения задачи анализа молекулярного состава газов применяют лазерные источники ионов [166, 167, 168]. В случае использования динамических схем и многоотражательных ионно-оптических систем существенным недостатком является невозможность анализа однократных событий.

6.6.2 Времяпролетные масс-спектрометры с ионизацией высокоскоростным соударением

Времяпролетные масс-спектрометры используются для определения химического состава частиц в космическом пространстве [169]. В этом случае ионизация исследуемого вещества может происходить в результате высокоскоростного соударения частицы ударника и мишени прибора.

Примером прибора такого типа является масс-спектрометр для регистрации состава частиц естественного и искусственного происхождения (рис. 6.20). За счет высокой скорости при соударении анализируемой частицы и мишени прибора происходит ионизация вещества частицы-ударника. Ионы образовавшейся плазмы выталкиваются из промежутка между мишенью 1 и сеткой 2 и через экранирующий цилиндр 3 пролетают в бесполовой участок, где, переотразившись зеркалом 4, сеткой 2 и электродом 5, попадают в детекторы 6. Разрешение прибора достигает 100 единиц при габаритах не более 370 мм [169].

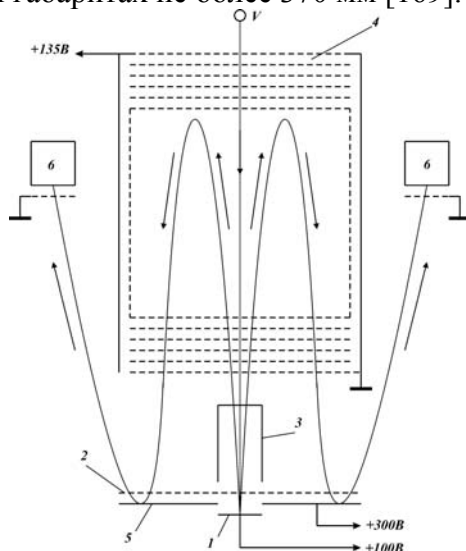


Рис. 6.20. Пылеударный масс-спектрометр: 1 – мишень; 2 – выталкивающая сетка; 3 – экран; 4 – электростатический отражатель; 5 – отклоняющие пластины; 6 – ВЭУ

Другой масс-спектрометр [170] показан на рис. 6.21. Масс-спектрометр содержит мишень 1 с выполненными в ней отверстиями. На поверхность мишени нанесена серебряная пленка. Со стороны ударяющих в мишень частиц установлено электростатическое фокусирующее зеркало 6-9, а с другой стороны – параболический отражатель ионов 2, фокусирующий их на приемник 3. Образовавшиеся при ударе ионы выталкиваются импульсом, сформированным в промежутке мишень – сетка. Электронный импульс, образованный при ударе на мишени, через усилитель-формирователь запускает блок формирования выталкивающего импульса.

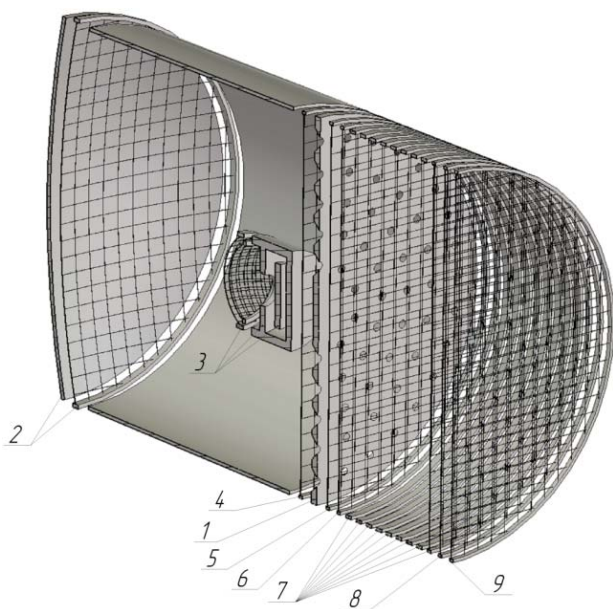


Рис. 6.21. Пылеударный масс-спектрометр с вогнутым отражателем: 1 – мишень; 2 – параболический отражатель; 3 – приемник ионов со сферическим корректором; 4 – сетка, ограничивающая бесполевое пространство; 5 – ускоряющая сетка; 6 – гасящая сетка; 7 – первый рефлектор зеркала, состоящий из восьми колец и сетки; 8 – сетка второго рефлектора; 9 – входная сетка

Образец бортового прибора для проведения лабораторных испытаний обладает следующими характеристиками: общая длина 280 мм, диаметр прибора 240 мм, масса 1,3 кг, суммарная потребляемая мощность ~7 Вт (вместе с блоком обработки ионных спектров).

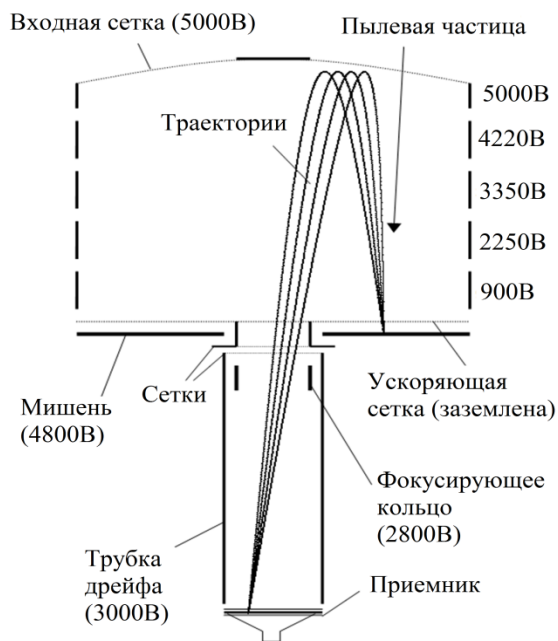
Ионы, образовавшиеся в результате высокоскоростного соударения, ускоряются между сетками 4 и 5, попадают в ионное зеркало 5-9, отражаются и пролетая сквозь отверстия в мишени, попадают в бесполовое пространство, затем, отразившись в параболическом отражателе и снова пролетев бесполовое пространство, попадают в приемник ионов.

Другими приборами подобного типа являются Dustbuster [171, 172, 173] и High-Flux Cosmic Dust Analysis, приведенные на рис. 6.22, а и б соответственно.

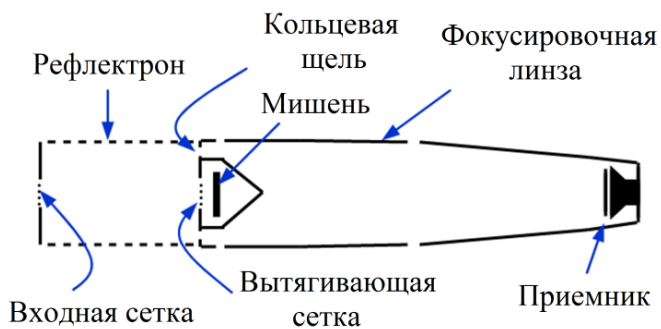
При испытании прибора Dustbuster применялся метод лазерной десорбции/ионизации, поскольку он по многим параметрам похож на ударную ионизацию, для захвата спектра применялся цифровой осциллограф с частотой дискретизации 200 МГц, в системе поддерживался вакуум 10^{-7} торр.

Конструкция High-Flux Cosmic Dust Analysis предложена авторами [174] для анализа высоких потоков частиц в космосе, имеет длину всего 28 см и отличается наличием линзы, фокусирующей пакеты ионов на приемник. При ускоряющем напряжении в 3 кВ прибор показывает 80-500 единиц для железа при скоростях соударения в 1-10 км/с. Недостатками данного прибора являются зависимость разрешающей способности от скорости соударения частицы-ударника и мишени и маленькая площадь чувствительной поверхности.

Примером малогабаритного прибора с высокой площадью мишени может послужить LAMA [175, 176, 177], изображенный на рис. 6.23.

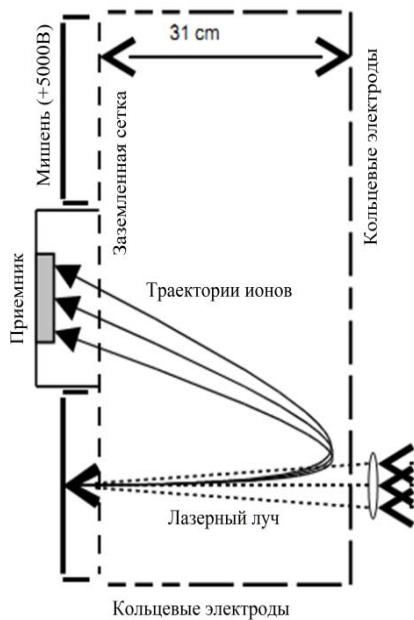


а)

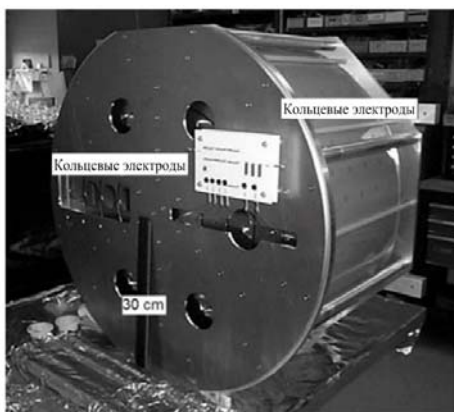


б)

Рис. 6.22. Пылеударный масс-спектрометр: а) Dustbuster; б) High-Flux Cosmic Dust Analysis



а)



б)

Рис. 6.23.Схема (а) и внешний вид (б) прибора Large Area Mass Analyzer

Данный масс-анализатор отличается отсутствием бесполого участка. Площадь мишени составляет $0,2 \text{ м}^2$, глубина прибора не превышает $0,4 \text{ м}$, ускоряющее напряжение и напряжение на зеркале составляет порядка $5\text{-}6 \text{ кВ}$. Для энергетического разброса ионов в 50 эВ разрешение прибора составляет порядка 200 единиц.

Другим прибором, используемым для анализа химического состава космических частиц, является CDA [178, 179, 180], представленный на рис. 6.24.

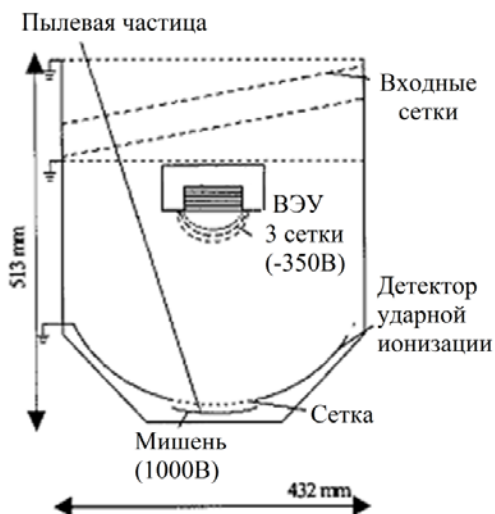
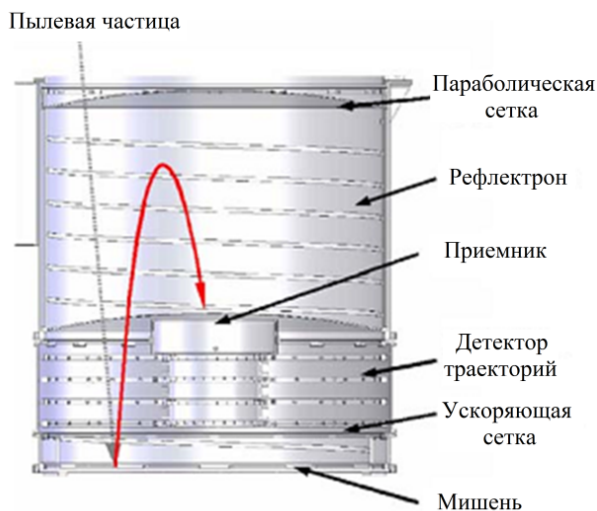


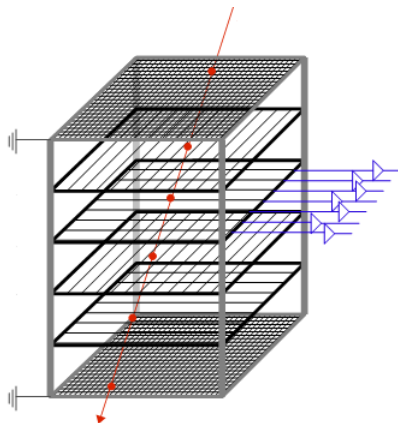
Рис. 6.24. Схема прибора Cassini Dust Analyzer

При массе в 17 кг данный прибор обладает площадью мишени в 200 см^2 , а также возможностью отслеживать направление потоков космических частиц. Разрешающая способность прибора при ускоряющем напряжении, равном 1 кВ , составляет $80\text{-}100$ единиц на 250 а.е.м.

Развитием данного направления в построении масс-анализаторов является прибор Dust Telescope [181, 182], изображенный на рис. 6.25.



а)



б)

Рис. 6.25. Схема (а) и принцип действия (б) прибора Dust Telescope

Диаметр прибора составляет 0,64 м, ускоряющее напряжение 5 кВ. Разрешающая способность 100-300 единиц при энергопотреблении 16 Вт. Отличительная особенность прибора – возможность построения траектории частицы-ударника.

Прибором другого типа является масс-спектрометр [183], приведенный на рис. 6.26. Данный прибор имеет 3 режима работы.

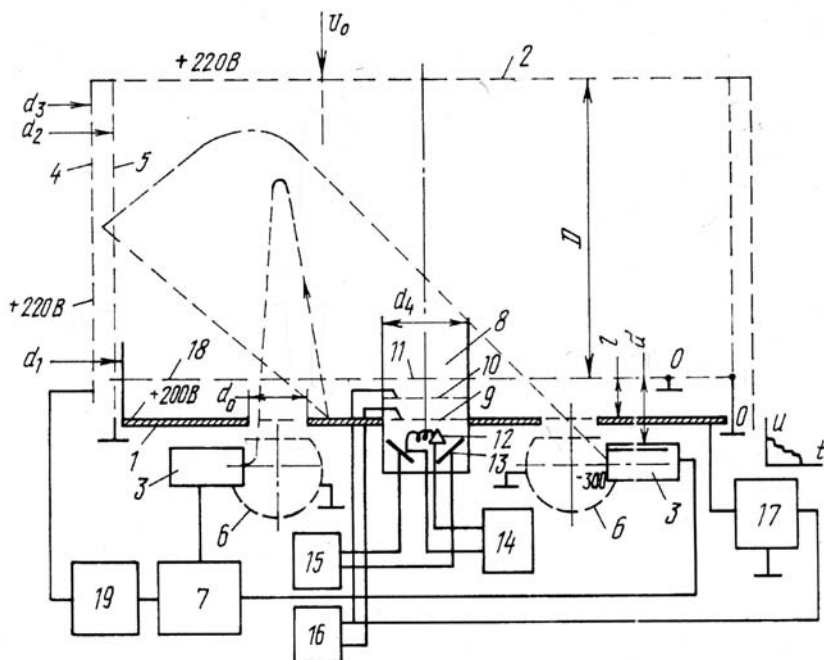


Рис. 6.26. Пылеударный масс-спектрометр:

- 1 – мишень; 2 – планарное электростатическое зеркало;
- 3 – детектор частиц; 4,5 – концентрическое зеркало;
- 6 – фокусирующие сетки у приемников; 7 – устройство записи и обработки;
- 8 – ионный источник; 9 – запирающий электрод;
- 10 – выталкивающий электрод; 11 – фокусирующий электрод;
- 12 – нагреватель; 13 – фокусатор; 14 – источник питания нити накала;
- 15 – источник питания фокусатора; 16 – блок управления запирающим электродом;
- 17 – генератор переменного напряжения; 18 – ускоряющий электрод; 19 – источник напряжения

В первом режиме происходит непосредственно анализ химического состава космических частиц. При этом ускорение ио-

нов происходит в промежутке мишень 1 – ускоряющая сетка 18, отражение потока ионов в промежутке сетка 18 – отражатель 2, сбор ионов происходит в приемнике 3 с помощью полусферических отражателей 6.

Во втором режиме возможен анализ газовой компоненты вокруг КА, при этом источником ионов выступает ионный источник с электронным ударом 8, в остальном работа устройства повторяет первый режим.

В третьем режиме происходит калибровка прибора с помощью анализа вещества мишени. Для этого запускается нагреватель 15, который нагревает отражатель источника электронов 13, далее аналогично второму режиму происходит ионизация испаренных атомов отражателя, их анализ.

В работах [184 – 187] показана правильность расчетов, описанных в [139, 183]. Однако ввиду влияния различных факторов, которые не могут быть полностью учтены в математической модели прибора, реальная разрешающая способность оказывается меньше и составляет 100–150 [188].

Некоторые характеристики масс-спектрометров сведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2. Сравнение масс-спектрометров для анализа космических пылевых частиц

Тип прибора	Технические характеристики	Отличительные особенности
Масс-рефлектроны	НВИ Длина бесполевого участка 25 см. Масса 1,5 кг. Ускоряющее напряжение 300 В. R = 100-150 единиц при V = 1-10 км/с	Применение параболических отражателей. Максимизация площади мишени в конструкциях. В зарубежных приборах высокое ускоряющее напряжение. Зависимость разрешения от места соударения. Невысокая разрешающая способность

Окончание табл. 6.2

LAMA	<p>HVI</p> <p>Отсутствует бесполовый участок.</p> <p>Глубина рефлектрона 31 см.</p> <p>Ускоряющее напряжение 5 кВ.</p> <p>$R = 200$ единиц при $\Delta E = 50$ эВ.</p> <p>Площадь мишени $0,2 \text{ м}^2$</p>	<p>Отсутствие бесполового участка.</p> <p>Применение системы концентрических колец.</p> <p>Высокое ускоряющее напряжение.</p> <p>Невысокая разрешающая способность</p>
CDA	<p>HVI</p> <p>Длина бесполового участка 250-300 мм.</p> <p>Масса 17 кг.</p> <p>Площадь поверхности мишени 200 см^2.</p> <p>Ускоряющее напряжение 1 кВ.</p> <p>$R = 100$ единиц при $m = 250$ а.е.м.</p>	<p>Возможность отслеживания направления потоков космических пылевых частиц.</p> <p>Невысокая разрешающая способность ввиду отсутствия рефлектрона</p>
Dust Telescope	<p>HVI</p> <p>Диаметр прибора 0,64 м.</p> <p>Масса 15 кг.</p> <p>Энергопотребление 16 Вт.</p> <p>Ускоряющее напряжение 5 кВ.</p> <p>$R = 100-300$ единиц</p>	<p>Возможность построения траектории частицы-ударника.</p> <p>Высокое ускоряющее напряжение.</p> <p>Невысокая разрешающая способность</p>

На основе данных табл. 6.2 можно сделать вывод о следующих путях развития пылеударных масс-спектрометров:

- увеличение ускоряющего напряжения;
- применение параболических отражателей для пространственной фокусировки пучков ионов;
- увеличение площади мишени.

К недостаткам вышеперечисленных путей можно отнести:

- сложность получения высокого разрешения из-за зависимости разрешающей способности от координаты соударения;
- сложность высоковольтной электроники как генерирующей, так и детектирующей части.

6.6.3 Времяпролетные масс-спектрометры с лазерной ионизацией

Для анализа проб твердых веществ и биоматериалов широко используются приборы с ионизацией лазерным излучением. При таком виде ионизации возможно как непосредственное воздействие лазерного излучения на анализируемое вещество, так и воздействие на компаунд, удерживающий частицы вещества анализата (т.н. MALDI ионизация).

При облучении лазером с длительностью импульса несколько наносекунд и высокими величинами интенсивности излучения ($10^6 - 10^7$ Вт/см²) из образца, представляющего собой твердый раствор или смесь анализируемого вещества и матрицы, происходит выброс материала в виде микрочастиц. Такие частицы могут достигать размеров несколько сотен микрометров. Над поверхностью образца возникает область высокого локального давления – так называемый факел, который преимущественно состоит из нейтральных частиц. Вместе с тем в нем присутствуют и заряженные частицы, доля которых по разным оценкам составляет $10^{-5} - 10^{-3}$ от полного числа всех частиц. На начальном этапе образования факела его плотность близка к плотности вещества в конденсированном состоянии.

С расширением факела (в первые наносекунды) происходит распад конгломератов вплоть до образования отдельных моле-

кул или их фрагментов, а также заряженных (преимущественно матричных) частиц. Ионизацию молекул, происходящую непосредственно при выбросе материала из конденсированного состояния, принято рассматривать как первичную.

В расширяющемся факеле происходят непрерывные соударения между частицами, в том числе возможны ион-молекулярные реакции между матричными заряженными частицами и молекулами анализируемого вещества, которые приводят к ионизации последнего. Такого рода ионизацию относят к вторичной.

Недостатком данного метода ионизации является высокий энергетический разброс ионов вещества-аналита, вызванный газодинамическим характером расширения облака плазмы в момент ионизации и достигающий от нескольких десятков до сотен электрон-вольт [189, 190].

Для анализа полученных ионов применяются масс-рефлектоны различных видов, так, например в ряде работ [191, 192, 193], предлагается использование т.н. отложенного ускорения. Структурная схема детектора с отложенным ускорением приведена на рис. 6.27.

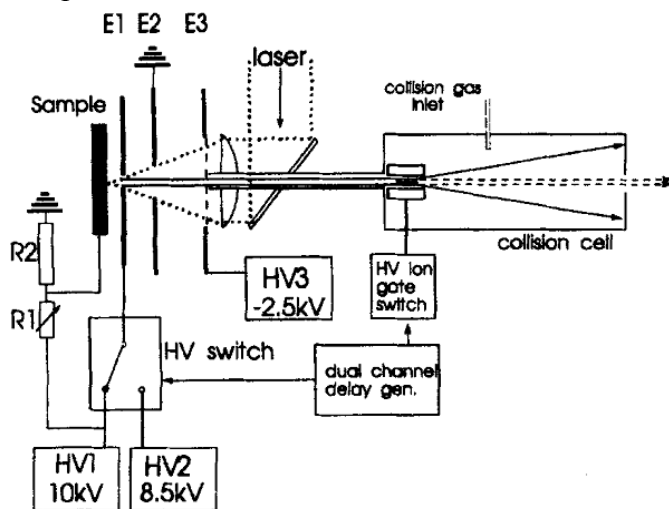


Рис. 6.27. Структурная схема детектора с отложенным ускорением

Ионы, образовавшиеся под воздействием лазерного излучения, прежде чем быть ускоренными в промежутке между сетками E1 и E2, «поджимаются» небольшим тормозящим полем 50-250 В/см между образцом и первым ускоряющим электродом E1. С ростом массы исследуемых молекул разрешающая способность возрастает и может достигать 1800-2000 единиц по сравнению с 220 единицами при использовании прямого ускорения. Однако для легких масс может теряться важная информация (immonium ions). Зависимость разрешающей способности от времени прилета иона для различных условий приведена на рис. 6.28.

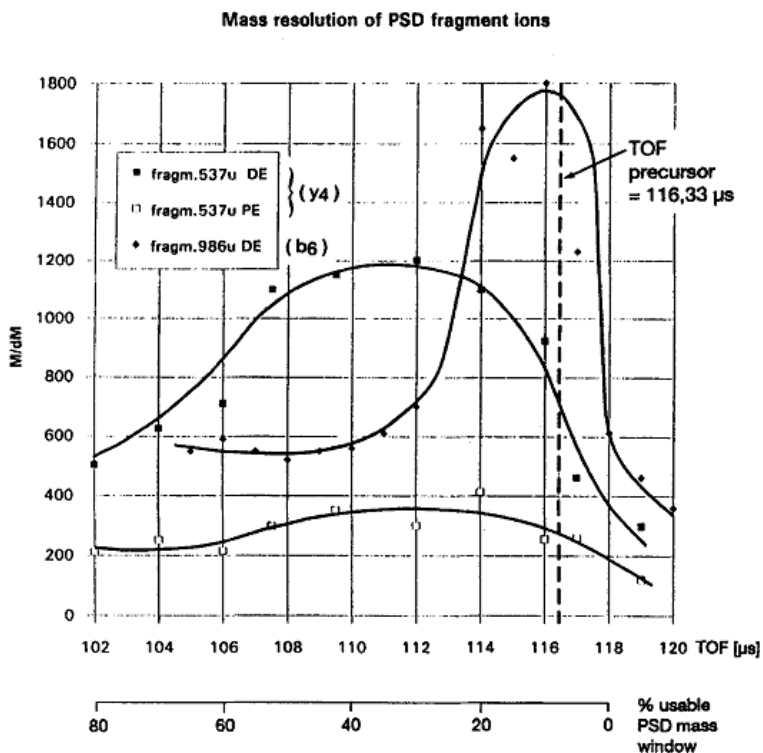


Рис. 6.28. Зависимость разрешающей способности от времени прилета иона для различных условий

Более высокую разрешающую способность демонстрируют приборы с отложенным ускорением и более высоким ускоряющим напряжением [194, 195]. Схема прибора с отложенной экстракцией и фокусировкой в источнике изображена на рис. 6.29.

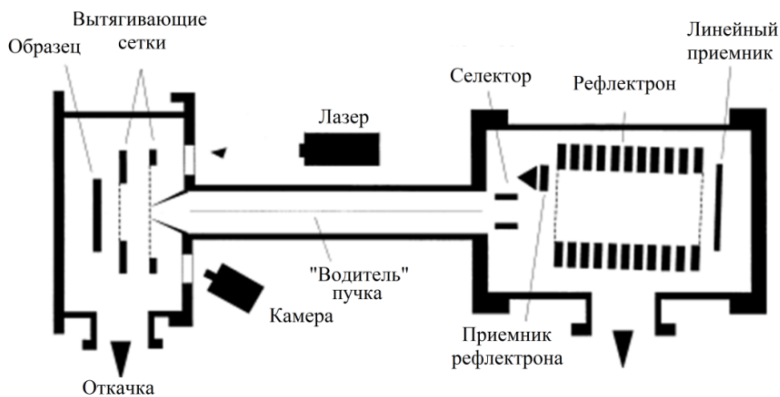


Рис. 6.29. Схема прибора с отложенной экстракцией и фокусировкой в источнике

Прибор [194] (конструкция на рис. 6.27) реализует только принцип отложенного ускорения. При длине бесполевого участка в 3,3 м и ускоряющем напряжении в 25кВ он демонстрирует разрешающую способность в 15000-20000 единиц. Прибор [194] (конструкция на рис. 6.29) с отложенной экстракцией и фокусировкой в источнике, имеющий также источник с двумя ускоряющими сетками, при длине бесполевого участка в 1.5 м и ускоряющем напряжении в 20кВ обладает разрешающей способностью до 20000 единиц.

Недостатком таких приборов, наряду с применением очень высоких ускоряющих напряжений, является зависимость величины паузы между импульсом ионизации и выталкивающим импульсом от массы, что приводит к определенной избирательности прибора.

Для улучшения характеристик приборов применяют динамическую фокусировку ионных пакетов. Так, например, в рабо-

тах [196, 197] описаны приборы с использованием переменных во времени электрических полей.

Схема прибора с динамической фокусировкой ионных пакетов приведена на рис. 6.30, зависимость ускоряющего напряжения от времени – на рис. 6.31. Прибор показал разрешающую способность от 8395 до 15132 единиц.

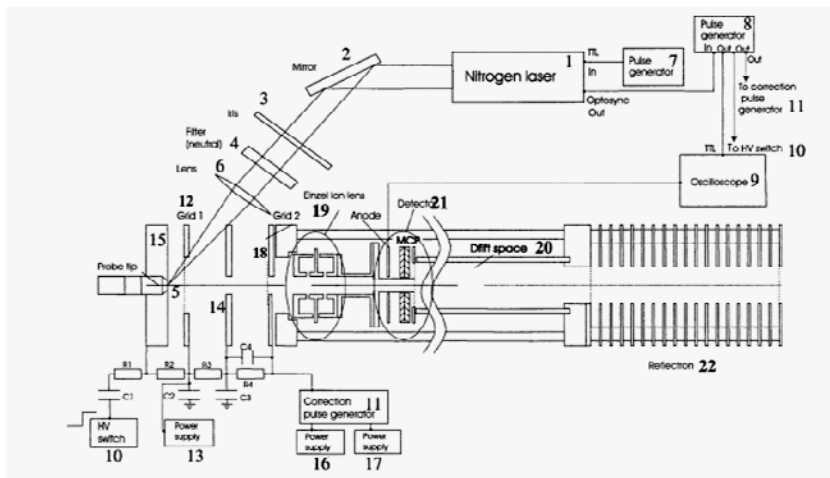


Рис.6.30. Структурная схема детектора с динамической компенсацией

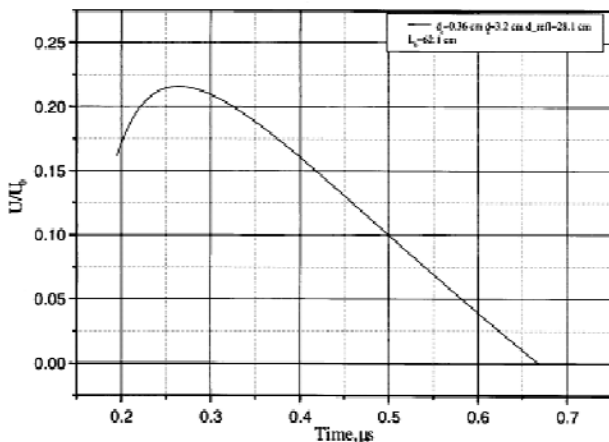


Рис. 6.31. Зависимость ускоряющего поля от времени

Для анализа твердых веществ предлагаются конструкции приборов [198, 199] с ионизацией лазерной десорбцией вещества. Схема прибора LAMS приведена на рис. 6.32.

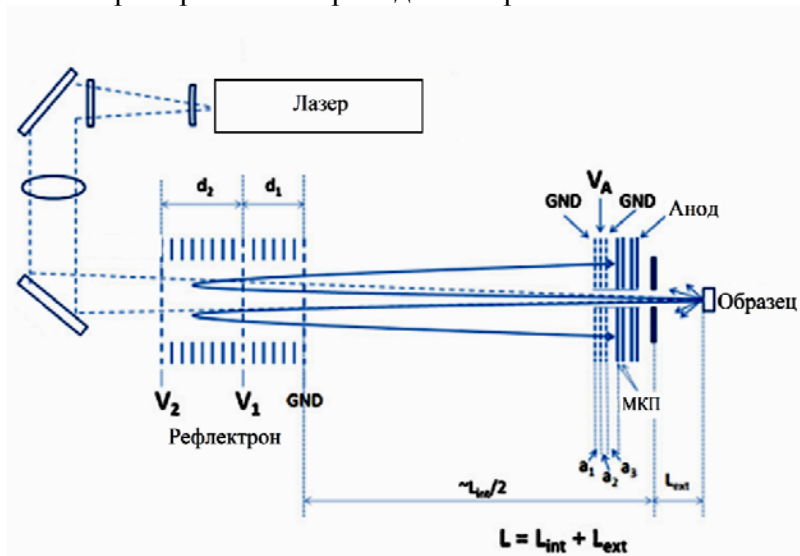


Рис. 6.32. Схема прибора LAMS

Прибор используется для анализа химического состава грунта и скальных пород. После ионизации лазерным импульсом ионы пролетают в отверстие в микроканальной пластине, после чего системой сеток происходит отсечка ионов с энергиями меньше 100 эВ. Пропущенные ионы пролетают бесполевым пространством и, отразившись в рефлектроне, попадают в приемник. Разрешение прибора составляет 200-700 единиц в зависимости от расстояния прибора до точки ионизации, длина пробега бесполевых участков 33-100 см. К недостаткам прибора относится невысокая разрешающая способность, а также низкая чувствительность.

Прибор [200] построен по схожей схеме, однако производит анализ только непосредственно поверхности, прилегающей к входному окну прибора. В результате появляется возможность ускорять ионы и фокусировать их в пучок. Разрешение для дан-

ного прибора составляет 1000 единиц для свинца. Габариты прибора составляют не более 30 см при ускоряющем напряжении в несколько кВ.

Сравнение характеристик масс-спектрометров для анализа твердых пород приведено в табл. 6.3.

Таблица 6.3. Сравнение масс-спектрометров для анализа твердых веществ

Тип прибора	Технические характеристики	Отличительные особенности
Масс-рефлектрон для анализа грунта или скальных пород	LDI Длина бесполевого участка 20 см. Масса 5 кг. Энергопотребление 10 Вт. Ускоряющее напряжение несколько кВ. R = 1000 единиц для Pb	Фокусировка второго порядка. Отсечка ионов меньше 0,8 $U_{\text{уск}}$. Бессеточный источник с фокусировкой пучка
LAMS	LDI R = 200-700 при длине бесполевого участка 33-100 см	Отсечка ионов с энергией меньше 100 эВ
Масс-спектрометры с отложенной экстракцией	MALDI Длина бесполевого участка 3,3 м. Ускоряющее напряжение 25 кВ, R = 10000-15000 единиц	Применение отложенной экстракции. Невозможность записи ионного спектра целиком. Высокое ускоряющее напряжение. Высокая разрешающая способность
Масс-спектрометр с отложенной экстракцией и фокусировкой в ионном источнике	MALDI Длина бесполевого участка 1,5 м. Ускоряющее напряжение 20 кВ, R до 20000 единиц	Применение отложенной экстракции. Применение источника ионов с фокусировкой. Невозможность записи ионного спектра целиком. Высокое ускоряющее

		напряжение. Высокая разрешающая способность
Масс-спектрометр с применением изменяющегося во времени электрического поля	MALDI Длина бесполового участка 120 см. Ускоряющее напряжение до 12 кВ. R = 10000-15000 единиц для m = 1300-5700 а.е.м.	Применение отложенной экстракции. Сложность восстановления формы высоковольтного импульса. Невозможность записи ионного спектра целиком. Высокое ускоряющее напряжение. Высокая разрешающая способность

Как видно из табл. 6.3, пути повышения разрешающей способности для масс-спектрометров с лазерной ионизацией включают в себя все вышеприведенные способы, а именно:

- повышение ускоряющего напряжения;
- применение динамических электрических полей;
- применение отложенной экстракции;
- применение рефлектронов и источников с фокусировкой по энергии.

Недостатками данных способов являются:

- сложность аппаратуры для работы с высокими напряжениями, особенно в контексте динамических схем;
- селективный эффект увеличения разрешающей способности для схем с динамическими электрическими полями и отложенной экстракцией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе рассмотрен комплекс вопросов, связанных с загрязнением поверхности летательного аппарата продуктами работы двигательных установок, газовой выделением конструкционных материалов и пылевыми частицами. Проанализированы существующие модели процессов массопереноса при образовании собственной внешней атмосферы космического аппарата, типы источников массы и их характеристики.

2. На базе существующих методов разработана методика расчета уровня загрязнения поверхности летательного аппарата продуктами выброса двигательных установок. При разработке методики были сделаны следующие допущения, приводящие при данной геометрии космического аппарата к завышению результатов расчета (оценка уровня загрязнения сверху):

- вся струя двигательной установки изотропно рассеивается;
- все молекулы, соударяющиеся с поверхностью полезного груза, прилипают к ней.

3. Разработана методика расчета загрязнения поверхности космического аппарата продуктами газовой выделением конструкционных материалов. При разработке методики были учтены свойства конструкционных материалов и их геометрическое расположение согласно техническому заданию. Были сделаны допущения, приводящие при данной геометрии космического аппарата к завышению результатов расчета:

- продукты газовой выделением конструкционных материалов рассеиваются изотропно;
- все молекулы, соударяющиеся с поверхностью полезного груза, прилипают к ней.

4. Разработана методика расчета загрязнения поверхности космического аппарата пылевыми частицами. При разработке

методики были сделаны следующие допущения, приводящие при данной геометрии космического аппарата к завышению результатов расчета:

- вылет частицы с поверхности носит равновероятный характер;
- все частицы, соударяющиеся с поверхностью, прилипают к ней.

5. При проведении расчетов считается, что уровень загрязнения блока выведения частицами на момент сброса ГО соответствует уровню 750 чистоты по частицам (MIL-STD -1246). Поверхности полезного груза считаются абсолютно чистыми.

6. В качестве примера рассмотрены вопросы загрязнения поверхности КА «ГЛОБАЛСТАР», связанные с работой ДУ, процессами газовой выделенной конструкционных материалов, а также вопросы загрязнения поверхности КА пылевыми частицами. Разработаны программы для ЭВМ, позволяющие определить уровни загрязнения поверхности КА.

7. При рассмотрении процессов конденсации низкомолекулярной составляющей выброса ДУ установлено, что самой неблагоприятной с точки зрения загрязнения является боковая поверхность спутника №3. Максимальный удельный уровень конденсации от работы ДУ для этой поверхности составляет $2,4 \cdot 10^{-10}$ кг/м²с. За время вывода ПГ на орбиту максимальный уровень загрязнения от работы ДУ составит 4,3 мг/м².

При определении уровня конденсации продуктов газовой выделенной конструкционных материалов установлено, что максимальный уровень загрязнения не превышает 6,8 мг/м².

Максимальное содержание частиц на поверхности ПГ соответствует уровню 500 (MIL-STD-1246).

8. Существующие принципы фокусировки кратко освещены в литературе по масс-спектрометрии, например [118, 120, 122]. Однако более подробно различные методы фокусировки ионных пакетов во времени рассматриваются в работах, посвященных разработке масс-спектрометрических приборов.

Так, например, в работах [135, 136, 137, 141, 142, 143, 144] описаны различные варианты фокусировки ионов по энергиям с

использованием статических ионных зеркал с одним, двумя или тремя отражающими промежутками. Разрешающая способность таких приборов может достигать 10000 при ограничении энергетического разброса ионов на уровне 10% от ускоряющего напряжения. Их основной недостаток – невозможность фокусировки ионов в широком диапазоне энергий (до 100% от ускоряющего потенциала).

9. Другим направлением развития методов фокусировки можно считать использование изменяющихся во времени электрических полей. Эти методы, например, описывают работы [148, 149, 150]. Также в эту категорию можно отнести приборы, реализующие принцип «post-source decay», т.е. отложенную экстракцию. Основными недостатками таких приборов является то, что фокусирующие свойства таких систем ограничены определенным диапазоном масс, а следовательно невозможным становится анализ однократных быстропротекающих процессов.

10. Наиболее близкой работой к теме данной диссертации является [187], в ней описан численный метод вычисления нелинейного распределения потенциалов отражателя, реализующий принцип фокусировки ионов в диапазоне энергий до 100% от ускоряющего потенциала. Однако ввиду того, что численное решение по своей сути является кусочно-линейным, описание им гладкой функции распределения потенциалов внутри реального отражателя без сеток является не совсем адекватным. С этой точки зрения аналитический подход к решению является более предпочтительным. Также к преимуществам аналитического подхода можно отнести более высокую точность получаемых значений поля.

11. В результате анализа вышеописанных конструкций масс-спектрометров для анализа веществ в различных фазовых состояниях можно сделать следующие выводы о перспективных способах повышения их разрешающей способности:

- Основной вклад в ухудшение разрешающей способности приборов вносит начальный энергетический разброс вещества-аналита. Причем в случае ионизации высокоскоростным соударением и лазерным импульсом данный разброс может состав-

лять десятки и даже сотни эВ и является неустранимым следствием самого способа ионизации. В случае же ионизации электронным ударом энергетический разброс является следствием разброса координат ионизации внутри ионного источника. Поэтому при конструировании приборов, основанных на источниках ионов с высокоскоростным соударением или лазерной ионизацией, необходима компенсация энергетических разбросов до нескольких сотен эВ. В случае конструирования приборов с ионизацией электронным ударом в большей мере необходима компенсация мешающих факторов, связанных с разбросом по координате, а это:

- энергетический разброс;
 - разброс времени выхода ионов из источника;
 - разброс по времени ионизации.
- Для решения задачи фокусировки ионных пакетов с высокими начальными энергетическими разбросами предлагается разработка нелинейного ионного зеркала, обеспечивающего изохронность траекторий ионов различных начальных энергий без ограничения диапазона анализируемых масс.
- Для решения задачи фокусировки ионов, вытянутых из протяженной области ионизации, предлагается разработка нелинейного ионного источника с отложенной экстракцией, обеспечивающего изохронность траектории ионов, образованных в различных точках в различное время.

Таким образом, предложена конструкция масс-спектрометра, отличающегося использованием источника ионов с электронной ионизацией и нелинейным распределением выталкивающего поля совместно с отражателем ионов с нелинейным распределением потенциала, что обеспечивает фокусировку ионов вытянутых из протяженной области ионизации с ненулевыми начальными скоростями, в плоскости приемника ионов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аэротермогазодинамика в разреженных потоках [Текст]: сб. науч. тр. – М.:Изд-во МАИ, 1988.
2. Басс, В.П. Рассеяние нерасчетных струй при формировании собственной атмосферы тел, движущихся на больших высотах [Текст] / В.П. Басс // Газодинамика и тепломассообмен летательных аппаратов: сб. науч. тр. – Киев: Наукова думка, 1988.
3. Басс, В.П. Анализ инженерных методов расчета параметров сверхзвуковой струи, истекающей в вакуум [Текст] / В.П. Басс, Л.В. Пяткина // Аэрогазодинамика и нестационарный тепломассообмен: сб. науч. тр. – Киев: Наукова думка, 1983.
4. Harvey, R.L. Spacecraft neutral self-contamination by molecular outgassing [Text] / R.L. Harvey // Journal of spacecraft and rockets, 1976, v.13. – №5. – P.301-305.
5. Rantofte, R.O. Spacecraft contamination modeling [Text] / R.O. Rantofte. – AIAA Paper, 1977. – № 0739. – P.1-12.
6. Барейсс, Л.Э. Метод расчета параметров собственной внешней атмосферы орбитальной станции «Спейслэб» [Текст] / Л.Э. Барейсс // Ракетная техника и космонавтика. – 1980. – № 2. – С. 97-108.
7. Simons G.A. Rarefaction effects in high altitude rocket plumes [Text] / G.A. Simons // AIAA Journal. – 1972, v.10. – № 3. – P. 296-300.
8. Simons, G.A. Effect of nozzle boundary layer on rocket exhaust plumes [Text] / G.A. Simons // AIAA Journal. – 1972, v.10. – № 11. – P. 1534-1535.
9. Boynton, F.P. Exhaust Plumes from Nozzles with Wall Boundary Layers [Text] / F.P. Boynton // Journal of Spacecraft and Rockets. – 1968, v.5. – №10.

10. Сибулкин, А.С. Приближенный расчет течения на больших расстояниях от сопла при истечении в вакуум [Текст] / А.С. Сибулкин, К.А. Галлахер // Ракетная техника и космонавтика. – 1963. – Т.1. – № 6. – С. 212-213.
11. Барейсс, Л.Э. Загрязнение поврхности ЛА от истечения струи из сопла с косым срезом [Текст] / Л.Э. Барейсс. – Аэрокосмическая техника. – 1989. – № 1. – С. 20-26.
12. Бургасов, М.П. Исследование потоков массы от струй, истекающих в вакуум [Текст] / М.П. Бургасов, В.Ф. Морозов, В.В. Рыбаков // VI Всесоюз. конф. по динамике разреженных газов: тез. докладов. – Новосибирск, 1979. – С.76.
13. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика. [Текст] / Г.Н. Абрамович.– 3-е изд., перераб. – М.: Наука, 1969. – 824 с.
14. Самарский, А.А. Разностные схемы газовой динамики [Текст] / А.А. Самарский, Ю.П. Попов. – М.: Наука, 1975.
15. Глазков, А.А. Вакуум электрофизических установок и комплексов [Текст] / А.А. Глазков, Г.Л. Саксаганский. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
16. Саксаганский, Г.Л. Сверхвысокий вакуум в радиационно-физическом аппаратостроении [Текст] / Г.Л. Саксаганский.– М.: Атомиздат, 1976.
17. Броуд, Г. Расчет взрывов на ЭВМ: Газодинамика взрывов. Механика, новое в зарубежной науке [Текст] / Г. Броуд. – М.: Мир, 1976.
18. Шлягун, А.Н. Исследование взаимодействия сверхзвуковой недорасширенной струи с затупленными телами вращения в сверхзвуковом потоке [Текст] / А.Н. Шлягун. – Тр. ЦАГИ, 1974. – Вып. 1598.
19. Roberts, L. The action of hypersonic jet on dust layer [Text] / L. Roberts. – LAS Paper, New York, 1963. – P. 63-50.
20. Askhenes H. The structure end utilization of supersonic free jets in low density wind tunnels [Text] / H. Askhenes, F.S. Sherman. Rarefied Gas Dynamics Forth symp. – New York, Acad Press, 1966.

21. Лейтес, Е.А. Распределение плотности в дальнем поле сверхзвуковой струи, истекающей в вакуум [Текст] / Е.А. Лейтес. – Тр. ЦАГИ, 1975. – Вып. 1672.
22. Мурзинов, И.Н. Параметры подобия при истечении сильно недорасширенных струй в затопленное пространство [Текст] / И.Н. Мурзинов // Механика жидкости и газа. – 1971. – № 4. – С. 143-149.
23. Сверхзвуковые струи идеального газа [Текст] / Г.И. Аверенкова, З.А. Ашратов, Т.Г. Волконская [и др.]. – М.: Вычисл. центр МГУ, 1970. – Ч. 1. – С. 279-283.
24. Жохов, В.А. Атлас сверхзвуковых течений свободно расширяющегося идеального газа, истекающего из осесимметричного сопла [Текст] / В.А. Жохов, А.А. Хомутский. – Тр. ЦАГИ, 1970. – Вып. 1224. – 82 с.
25. Дулов, В.Г. Газодинамика процессов истечения [Текст] / В.Г. Дулов, Г.А. Лукьянов. – Новосибирск: Наука, 1984.
26. French, J.V. Continuum – source molecular beams [Text] / J.V. French // AIAA Journal. – 196, vol. 3, – № 6. – P. 993-1000.
27. Исследование сверхзвуковых течений газа в струях [Текст] / Э.А. Ашратов, Т.Г. Волконская, Г.С. Росляков [и др.] // Некоторые применения метода сеток в газовой динамике. – Вып.6: Течение газа в соплах и струях. – М.: МГУ, 1974. – С. 241-407.
28. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика: Механика [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1973.
29. Фильчаков, П.Ф. Численные и графические методы прикладной математики [Текст] / П.Ф. Фильчаков. – Киев: Наукова думка, 1970.
30. Кириллин, В.А. Техническая термодинамика [Текст] / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейдлин. – М.: Энергия, 1974.
31. Акишин, А.И. Методы имитации воздействия окружающей среды на материалы космических аппаратов [Текст] / А.И. Акишин, Л.С. Новиков. – М.: Изд-во МГУ, 1986.
32. Басс, В.П. Численное моделирование процессов массопереноса в окрестности тел сложной геометрической формы

- [Текст] / В.П. Басс, В.И. Бразинский // Аэродинамика, тепло- и массообмен в разреженном газе. – М., 1986.
33. Кузовкин, К.Н. Численное моделирование процессов массопереноса около поверхностей летательных аппаратов [Текст] / К.Н. Кузовкин, С.Б. Свирщевский // IV Всесоюз. школа по методам аэрофизических исследований. – Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1986.
 34. Власов, В.И. Собственная атмосфера вблизи орбитального аппарата и моделирование условий на его поверхности [Текст] / В.И. Власов, Б.Е. Жестков, А.И. Омелик. – Динамика разреженного газа: тр. IV Всесоюз. конф. – Новосибирск: Институт теплофизики, 1980. – Ч. 2.
 35. Бургасов, М.Л. Исследование потоков массы от струй, истекающих в вакуум [Текст] / М.Л. Бургасов, В.Ф. Морозов, В.В. Рыбаков // IV Всесоюз. конф. по динамике разреженных газов: тез. докладов. – Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1979.
 36. Романов, Г.С. Нестационарное осесимметрическое движение газа при энерговыделении у его поверхности [Текст] / Г.С. Романов, А.В. Тетерев // ДАН БССР, 1976. – Т. 20. – № 8.
 37. Еремин, А.В. Исследование формирования струи газа при истечении в разреженное пространство [Текст] / А.В. Еремин, В.А. Кочнев, И.М. Набоко // ПМТФ. – 1975. – № 2.
 38. Баранцев, Р.Г. Взаимодействие разреженных газов с обтекаемыми поверхностями [Текст] / Р.Г. Баранцев. – М.: Наука, 1975.
 39. Баранцев, Р.Г. Аналитические методы в динамике разреженных газов [Текст] / Р.Г. Баранцев // Итоги науки и техники. Серия. Механика жидкости и газа. – 1981. – Т. 14.
 40. Влезьен, Р.В. Влияние формы среза сопла на параметры струи [Текст] / Р.В. Влезьен, В. Кайбенс // Аэрокосмическая техника. – 1987. – № 6.
 41. Исли, Р. Численное исследование двухфазных струй [Текст] / Р. Исли, Я. Умеда // Аэрокосмическая техника. – 1988. – № 12.
 42. Дэм, В.Дж.А. Исследование процессов массопереноса и смешения в турбулентных струях [Текст] / В.Дж.А. Дэм, П.Э. Димотакис // Аэрокосмическая техника. – 1988. – № 3.

43. Тепло- и массообмен. – М.: ВИНТИ, 1980.
44. Галин, Н.М. Тепломассообмен (в ядерной технике) [Текст] / Н.М. Галин, П.Л. Кириллов. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
45. Ершов, Ю.И. Методы решения краевых задач теории переноса [Текст] / Ю.И. Ершов. – М.: Атомиздат, 1977.
46. Ершов, Ю.И. Математические основы теории переноса [Текст] / Ю.И. Ершов, С.Б. Шихов. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
47. Всесоюзная научно-техническая конференция по аэродинамике, динамике полета, управлению эффективностью ЛА [Текст] : тез. докладов. – М.: МАИ, 1979.
48. Scialdone, J.J. Self-contamination and environment an orbiting satellite [Text] / J.J. Scialdone // Journal of vacuum and technology. – 1972, v.9. – № 2.
49. Аэродинамика, тепло- и массообмен в дисперсных потоках [Текст]. – М.: Наука, 1967.
50. Бабенко, Ю.И. Тепломассообмен: Методика расчета тепловых и диффузионных потоков [Текст] / Ю.И. Бабенко. – Л. : Химия, 1986.
51. Коздоба, Л.А. Электрическое моделирование явлений тепло- и массопереноса [Текст] / Л.А. Коздоба. – М.: Энергия, 1972.
52. Померанцев, А.А. Физические начала тепломассообмена и газодинамики [Текст] / А.А. Померанцев. – М.: Энергия, 1977.
53. Цой, П.В. Методы расчета задач тепломассообмена [Текст] / П.В. Цой. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
54. Отдельные задачи тепло- и массообмена между потоками и поверхностями [Текст] : сб. науч. тр. – М.: МАИ, 1986.
55. Панкратов, Б.М. Взаимодействие материалов с газовыми потоками [Текст] / Б.М. Панкратов. – М.: Машиностроение, 1976.
56. Патанкар, С.В. Тепло- и массообмен в пограничных слоях [Текст] / С.В. Патанкар, Д.Б. Сплдинг. – М.: Энергия, 1971.
57. Исследование процессов переноса в газах, жидкостях и твердых телах [Текст] : сб. науч. тр. – Минск: ИТМО, 1979.
58. Гидрогазодинамика течений с тепломассообменом [Текст] : межвуз.сб. – Устинов: УМИ, 1986.

59. Перепухов, В.А. Применение метода Монте-Карло в динамике сильно разреженного газа [Текст] / В.А. Перепухов. – М., 1972.
60. Соболев, И.М. Численные методы Монте-Карло [Текст] / И.М. Соболев. – М.: Наука, 1975.
61. Гудман, Ф. Динамика рассеяния газа поверхностью [Текст] / Ф. Гудман, Г. Вахман. – М.: Мир, 1980.
62. Селезнев, В.Д. Многократность столкновений с поверхностью и нестационарное ядро рассеяния при отражении газа от твердого тела [Текст] / В.Д. Селезнев, И.П. Александрович, В.Д. Акиншин // Поверхность. Физика. Химия. Механика. – М.: Наука, 1990. – № 3.
63. Дюваль, П. Высоковакуумное производство в микроэлектронной промышленности [Текст] / П. Дюваль. – М.: Мир, 1992.
64. Исследование теплообмена в летательных аппаратах [Текст] : сб. науч. тр. – М.: МАИ, 1982.
65. Поляев, В.М. Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов [Текст] / В.М. Поляев. – М.: Машиностроение, 1988.
66. Проблемы механики и теплообмена в космической технике [Текст] : сб. ст. – М.: Машиностроение, 1982.
67. Современные проблемы теплообмена в авиационной технике [Текст] : сб. науч. тр. – М.: МАИ, 1983.
68. Теплообмен в авиационной технике [Текст] : сб. науч. тр. – М.: МАИ, 1984,
69. Гидродинамика и тепломассообмен течений жидкости со свободной поверхностью [Текст] : сб. науч. тр. / АН СССР – Новосибирск, 1985.
70. Вопросы прикладной аэрогидромеханики и тепломассообмена [Текст] : сб.ст. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1983.
71. Тепло- и массоперенос: Исследования и разработки [Текст] : сб. ст. // АН БССР. – Минск: ИТМО, 1978.
72. Газодинамика и процессы тепломассообмена [Текст] : сб. науч. тр. // АН УССР. – Киев: Наукова думка, 1986.
73. Тепло- и массообмен между потоками и поверхностями [Текст] : сб. ст. – М.: МАИ, 1979.

74. Тепло- и массообмен при взаимодействии потока с поверхностью [Текст] : сб. науч. тр. – М.: МАИ, 1981.
75. Тепло- и массообмен при взаимодействии потоков с поверхностями [Текст] : сб. ст. – М.: МАИ, 1978.
76. Физическая газодинамика, теплообмен и термодинамика газов высоких температур [Текст]. – М.: Изд-во АН СССР, 1962.
77. Абраменко, Т.Н. Термическая диффузия в газах [Текст] / Т.Н. Абраменко. – Минск: Наука и техника, 1982.
78. Фазовые и химические превращения при взаимодействии тел с потоком газа [Текст] : сб. науч. тр. – Минск: ИТМО, 1975.
79. Динамика разреженных газов [Текст] : сб. науч. тр. – Новосибирск: Ин-т теплофизики, 1976.
80. Динамика разреженных газов и молекулярная газовая динамика [Текст] : сб. ст. – М.: ЦАГИ, 1990.
81. Аэродинамика и нестационарный тепломассообмен [Текст] : сб. науч. тр. – Киев: Наукова думка, 1983.
82. Аэрогидромеханика [Текст] : учеб. для втузов. – М.: Машиностроение, 1993.
83. Аэродинамика гиперзвуковых течений при наличии вдува [Текст] : сб. ст. – М.: Изд-во МГУ, 1979.
84. Аэродинамика ракет [Текст]. – М.: Мир, 1989.
85. Аэрофизика и прикладная математика [Текст] : сб. науч. тр. – М.: МФТИ, 1981.
86. Аэромеханика и газодинамика [Текст] : сб. ст. – М.: Наука, 1976.
87. Газодинамика и акустика струйных течений [Текст] : сб. науч. тр. – Новосибирск: ИТПМ, 1979.
88. Газодинамика сверхзвуковых неизобарических струй [Текст]. – М.: Машиностроение, 1989.
89. Термогазодинамика турбулентных течений [Текст] : сб. науч. тр. – Новосибирск: ИТФ, 1986.
90. Термодинамические свойства и свойства переноса газов, жидкостей и твердых тел [Текст] : сб. ст. – М., Л.: Изд. Энергия, 1964.

91. Грин, Х. Аэрозоли-пыли, дымы, туманы [Текст] / Х. Грин, В. Лейн. – Л.: Химия, 1972.
92. Мусинов, М.Д. Воздействие и моделирование космического вакуума [Текст] / М.Д. Мусинов. – М.: Машиностроение, 1982.
93. Акишин, А.И. Эмиссионные процессы при воздействии на материалы факторов космической среды [Текст] / А.И. Акишин, Л.С.Новиков // Космическая технология и материаловедение. – М.: Наука, 1982.
94. Грошковский, Я. Техника высокого вакуума [Текст] / Я. Грошковский. – М.: Мир, 1975.
95. Пипкс, А.И. Конструирование и расчет вакуумных систем [Текст] / А.И. Пипкс, В.Я. Плисковекий, Е.А. Пенко. – М.: Энергия, 1979.
96. Левич, В.Г. Физико-химическая гидродинамика [Текст] / В.Г. Левич. – М.: Физматгиз, 1959.
97. Ромадин, В. Пылеприготовление [Текст] / В.Ромадин. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957.
98. Бусройд, Р. Течения газа со взвешенными частицами [Текст] / Р. Бусройд. – М.: Мир, 1975.
99. Абсорбция и пылеулавливание в производстве минеральных удобрений [Текст]. – М.: Химия, 1987.
- 100.Алиев, Г. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов [Текст] / Г.Алиев. – М., 1986.
- 101.Мизонов, В.Е. Аэродинамическая классификация порошков [Текст] / В.Е.Мизонов. – М.: Химия, 1989.
- 102.Моделирование и проектирование систем гидрообезпыливания [Текст]. – Киев: Наукова думка, 1990.
- 103.Стари, С. Пылеулавливание и очистка газов в металлургии [Текст] / С. Стари. – М.: Металлургия, 1977.
- 104.Lee, A.L. Particle dispersion around a spacecraft.. Research specialist [Text] / A.L. Lee // Space System Division Member AIAA. – Vol. 2. – № 7, 1984.
- 105.Muscari, K.R. The Particulate Environment Around Sensitive Payload [Text] / K.R. Muscari // AIAA 20th Thermophysic Conference/ June 19-21, 1985/ Williamsburg Virginia.

106. Simpson, J.P. Effect of the Shuttle contaminant environment on a sensitive infrared telescope [Text] / J.P. Simpson, F.C. Witterborn // Applied option. – 1977, vol. 16. – № 8. – P. 2051-2073.
107. Ван-дер-Хюлст. Рассеяние света малыми частицами [Текст] / Ван-дер-Хюлст. – М.: Издатминлит, 1961. – 437с.
108. Борен, К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами [Текст] / К. Борен, Д. Хафмен. – М.: Мир, 1986. – 723 с.
109. Пршивалко, А.П. О распределении в однородных поглощающих частицах, освещаемых параллельным пучком света [Текст] / А.П. Пршивалко, А.Г. Астафьева // ЖПС. – 1972. – Т. 16. – № 2. – С. 344-350.
110. Байбородин, Ю.В. Введение в лазерную технику [Текст] / Ю.В. Байбородин. – Киев: Техника, 1972. – 271с.
111. Федоров, Б.Ф. Лазерные приборы и системы летательных аппаратов [Текст] / Б.Ф. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 292 с.
112. Марк, Х. Влияние тарированного воздействия микрометеоров на тепловые свойства поверхности [Текст] / Х. Марк, Р.Д. Соммерс, М.Дж. Мерич // Ракетная техника и космонавтика. – 1966. – Т. 4. – № 10. – С. 149-157.
113. Vedder, R.H. Sp.Seirev [Text] / R.H.Vedder. – 1966. – V. 6. – 395 p.
114. Мишанин, М.С. Основы проектирования лазерных локационных систем [Текст] / М.С. Мишанин, Р.П. Канинский, Ю.Б. Борисов. – М.: Высш. шк., 1983. – 251 с.
115. Harriot, W.F. Leaviat [Text] / W.F. Harriot // Transpoation systems center private communication. 1976.
116. Herbert, C.G. Mass spectrometry basics [Text] / C.G. Herbert, R.A.W. Johnstone. – Florida: CRC Press LLC, 2003. – 473 p.
117. Chhabil, D. Fundamentals of contemporary mass spectrometry [Text] / D. Chhabil. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. – 587 p.
118. Cotter, R.J. Time-of-flight mass spectrometry: instrumentation and applications in biological research [Текст] / R.J. Cotter. – Washington DC: American chemical society, 1997. – 333 p.

119. Пат. 1691905 СССР, МПК Н 01 J 49/40. Способ формирования массовой линии ионов во времяпролётном масс-спектрометре [Текст] / Н.Д. Сёмкин, Г.Я. Юсупов, В.А. Бочкарёв, С.М. Семенчук; заявитель и патентообладатель Самарский авиационный институт им. акад. С.П. Королева. – № 4467226; заявл. 29.07.1988; опубл. 15.11.1991, Бюл. № 40.
120. Hoffmann, E. de. Mass spectrometry: principles and applications [Text] / E. de Hoffmann, V. Stroobant. – West Sussex: John Wiley & Sons, 2007. – 502 p.
121. Gross, J. H. Mass spectrometry [Text] / J.H. Gross. – Berlin: Springer, 2011. – 754 p.
122. Watson, J.T. Mass spectrometry: instrumentation, applications and strategies for data interpretation [Text] / J.T. Watson, O.D. Sparkman. – West Sussex: John Wiley & Sons, 2007. – 835 p.
123. Quantitative applications of mass spectrometry [Text] / I. Lavagnini, F. Magno, R. Seraglia [et al.]. – West Sussex: John Wiley & Sons, 2006. – 138 p.
124. Сёмкин, Н.Д. Проектирование масс-спектрометров для космических исследований [Текст] / Н.Д. Сёмкин. – Самара: СГАУ, 2000. – 165 с.
125. Mass spectrometry: instrumentation, interpretation, and applications [Text] / R. Ekman, J. Silberring, A. Westman-Brinkmalm [et al.]. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. – 390 p.
126. Yinon, J. Advances in forensic applications of mass spectrometry [Text] / J. Yinon. – Florida: CRC Press LLC, 2004. – 286 p.
127. Dempster, A. J. Positive ray analysis of lithium and magnesium [Text] / A.J. Dempster // Physical Review. – 1921. – Vol. 18. – Issue 6. – P. 415-422.
128. Bleakney, W. A new method of positive ray analysis and its application to the measurement of ionization potentials in mercury vapor [Text] / W. Bleakney // Physical Review. – 1929. – Vol. 34. – Issue 1. – P. 157-160.
129. Nier, A.O. A mass spectrometer for isotope and gas analysis [Text] / A.O. Nier // Review of scientific instruments. – 1947. – Vol. 18. – Issue 6. – P. 398-412.

130. Herzeler, H. Photon impact studies of molecules with a mass spectrometer [Text] / H. Herzeler, M.G. Inghram, J.D. Morrison // The journal of chemical physics. – 1958. – № 28. – P 76-82.
131. Barshick, C.M. Inorganic mass spectrometry: fundamentals and applications [Text] / C.M. Barshick, D.C. Duckworth, D.H. Smith. – NY: Marcel Dekker, 2000. – 517 p.
132. Suitcasae TOF: a man-portable time-of-flight mass spectrometer [Text] / S.A. Ecelberger, T.J. Cornish, B.F. Collins [et al.] // Johns Hopkins APL technical digest. – 2004. – Vol. 25, № 1. – P. 14-19.
133. Пат. US 5994695 A USA, МПК Н 01 J 49/06, Н 01 J 49/02, Н 01 J 49/40. Optical path devices for mass spectrometry [Текст] / J.E. Young, заявитель и патентообладатель Hewlett-Packard Company. – № US 09/087,787; заявл. 29.05.1998; опубл. 30.11.1999, Бюл. № 49.
134. Пат. 1095272 СССР, МПК Н 01 J 49/40. Времяпролетный масс-спектрометр [Текст] / И.Д. Ковалев, Н.В. Ларин, А.И. Сучков, В.Я. Мотовичев; заявитель и патентообладатель Институт химии АН СССР. – № 3441585; заявл. 24.05.1982; опубл. 30.05.1984, Бюл. № 20. – 14 с.
135. Short, R.T. Improved energy compensation for time-of-flight mass spectrometry [Text] / R.T. Shot, P.J. Todd // Journal of American society for mass spectrometry. – 1994. – № 5. – P. 779-787.
136. Kaufmann, R.L. Microscopica Acta [Text] / R.L. Kaufmann, F. Hillenkamp, E. Remy // Die Lasermicrosonde. – 1972. – Bd. 73, №1. – P. 1-18.
137. Kaufmann, R.L. Laser-Microprobe Mass Analysis [Text] / R.L. Kaufmann, F. Hillenkamp, R. Wechsung // European spectroscopy news. – 1978. – № 20. – P. 41-43.
138. Oetjen, G.H. Focussing errors of a multiple-focusing time-of-flight mass spectrometer with an Electrostatic Sector Field [Text] / G.H. Oetjen, W.P. Poschenrieder // International journal of mass spectrometry and ion physics. – 1975. – V.16, № 4. – P. 546-551.
139. Пат. 2003199 Российская Федерация, МПК Н 01 J 49/40. Времяпролётный масс-спектрометр [Текст] / В.А. Бочкарёв,

- Н.Д. Сёмкин, О.Ю. Колесников; заявитель Самарский авиационный институт им. акад. С.П. Королева; патентообладатели В.А. Бочкарёв, Н.Д. Сёмкин, О.Ю. Колесников. – № 04897842; заявл. 19.10.1991; опубл. 15.11.1993, Бюл. № 41-42. – 6 с.
140. Мангадзе, Г.Г. Количественный безэталонный экспресс-анализ некоторых сплавов на лазерном времяпролетном масс-спектрометре [Текст] / Г.Г. Мангадзе, Н.Г. Мангадзе // ЖТФ. – 1999. – Т. 69, вып. 10. – С. 138-192.
141. Глащенко, В.П. Пространственно-временная фокусировка ионов, выталкиваемых из протяженной области ионизации [Текст] / В.П. Глащенко // ЖТФ. – 1987. – Т. 57, вып. 6. – С. 1142 -1145.
142. Масс-рефлектрон. Новый безмагнитный времяпролётный масс-спектрометр с высокой разрешающей способностью [Текст] / Б.А. Мамырин, В.И. Каратаев, Д.В. Шмикк [и др.] // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1973. – Т. 64, вып. 1. – С. 82-89.
143. Каратаев, В. И. Новый принцип фокусировки ионных пакетов во времяпролетных масс-спектрометрах [Текст] / В.И. Каратаев, Б.А. Мамырин, Д.В. Шмикк // ЖТФ. – 1971. – Т. XLI, вып. 7. – С. 1498 – 1501.
144. Шмикк, Д.В. Отражатель масс-рефлектрона [Текст] / Д.В. Шмикк, Б.М. Дубенский // ЖТФ. – 1984. – Т. 54, вып. 5. – С. 912- 916.
145. Сёмкин, Н.Д. Моделирование масс-спектрометров с применением линейного и нелинейного зеркал [Текст] / Н.Д. Сёмкин, И.В. Пияков, Д.В. Родин // Вестн. СГАУ. – 2013. – № 1 (39). – С. 230-237.
146. Berkout, V.D. Miniaturized EI/Q/oa TOF mass spectrometer [Text] / V.D. Berkout, R.J. Cotter, D.P. Sergers // Journal of American society for mass spectrometry. – 2001. – № 12. – P. 641-647.
147. Пат. 2025821 СССР, МПК Н 01 J 49/40. Времяпролётный масс-спектрометр [Текст] / В.А. Бочкарёв, Н.Д. Сёмкин, Г.Ю. Юсупов; заявители и патентообладатели В.А. Бочкарёв, Н.Д.

- Сёмкин, Г.Ю. Юсупов – № 4756208/21; заявл. 04.11.1989; опубл. 30.12.1994, Бюл. № 31.
148. Kovtoun, S.V. Mass correlated acceleration in a reflectron MALDI TOF mass spectrometer: an approach for enhanced resolution over a broad mass range [Text] / S.V. Kovtoun, R.D. English, R.J. Cotter // Journal of American society for mass spectrometry. – 2002. – № 13. – P. 135-143.
149. Метод компенсации временного разброса ионов во время-пролетном масс-спектрометре [Текст] / Н.Д. Семкин, Д.В. Родин, И.В. Пияков [и др.] // Научное приборостроение. – 2012. – Т. 22. – № 4 – С. 17-25.
150. Beam deflection for temporal encoding in time-of-flight mass spectrometry [Text] / G.E. Yefchak, G.A. Schltz, J. Allison [et al.] // Journal of American society for mass spectrometry. – 1990. – № 1. – P. 440-447.
151. Kurnosenko, S. On the high-resolution mass analysis of the product ions in tandem time-of-flight (TOF/TOF) mass spectrometers using a time-dependent re-acceleration technique [Text] / S. Kurnosenko, E. Moskovets // Rapid communications in mass spectrometry. – 2010. – № 24. – P. 63-74.
152. Multi-reflection TOF analyzer for high resolution MS and parallel MS-MS [Text] / A.N. Verentchikov, M.I. Yavor, Y.I. Hasin [et al.] // Масс-спектрометрия. – 2005. – № 2 (1). – С. 11-23.
153. Planar multi-reflecting time-of-flight mass analyzer with a jigsaw ion path [Text] / M. Yavor, A. Verentchikov, J. Hasin [et al.] // Physics Procedia I. – 2008. – P. 391-400.
154. Многоотражательный планарный времяпролетный масс-анализатор. I. Анализатор для параллельного тандемного спектрометра [Текст] / А.Н. Веренчиков, М.И. Явор, Ю.И. Хасин [и др.] // ЖТФ. – 2005. – Т. 75, вып. 1. – С. 74-82.
155. Первые экспериментальные исследования планарного многоотражательного ВПМС [Текст] / Ю.И. Хасин, А.Н. Веренчиков, М.А. Гаврик [и др.] // Научное приборостроение. – 2004. – Т. 14, № 2. – С. 59-71.

- 156.Веренчиков А.Н. Концепция многоотражательного масс-спектрометра с непрерывным источником ионов [Текст] / А.Н. Веренчиков // Научное приборостроение. – 2006. – Т. 16, № 3. – С. 3-20.
- 157.Повышение чувствительности и массовой точности многоотражательного времяпролетного масс-спектрометра с непрерывным источником ионов [Текст] / Ю.И. Хасин, М.А. Гаврик, Б.Н. Козлов [и др.] // Научное приборостроение. – 2006. – Т. 16, № 4. – С. 11-18.
- 158.Планарный времяпролетный многоотражательный масс-спектрометр с ортогональным вводом из непрерывных источников ионов [Текст] / Ю.И. Хасин, М.А. Гаврик, М.И. Явор [и др.] // Научное приборостроение. – 2006. – Т. 16, № 3. – С. 30-39.
- 159.Многоотражательный времяпролетный масс-спектрометр с ионной ловушкой на входе [Текст] / Б.Н. Козлов, А.С. Труфанов, М.И. Явор [и др.] // Научное приборостроение. – 2006. – Т. 16, № 3. – С. 40-48.
- 160.Планарный времяпролетный анализатор в режиме многократных отражений и высокого разрешения [Текст] / Ю.И. Хасин, А.Н. Веренчиков, М.А. Гаврик [и др.] // Научное приборостроение. – 2005. – Т. 15, № 2. – С. 112-120.
- 161.The design and characteristic features of a new time-of-flight mass spectrometer with a spiral ion trajectory [Text] / T. Satoh, H. Tsuno, M. Iwanaga [et al.] // Journal of American society for mass spectrometry. – 2005. – № 16. – P. 1969-1975.
- 162.Satoh, T. Development of high-performance MALDI-TOF mass spectrometer utilizing a spiral ion trajectory [Text] / T. Satoh, T. Sato, J. Tamura // Journal of American society for mass spectrometry. – 2007. – № 18. – P. 1318-1323.
- 163.Development of a tandem time-of-flight mass spectrometer “MULTUM-TOF/TOF” at Osaka university: combination of a multi-turn time-of-flight mass spectrometer and a quadratic-field ion mirror [Text] / M. Toyoda, A.E. Giannakopoulos, A.W. Colburn [et al.] // Physics Procedia I. – 2008. – P. 401-411.
- 164.High-energy collision-induced dissociation of phosphopeptides using a multi-turn tandem time-of-flight mass spectrometer “MILTUM-TOF/TOF” [Text] / S. Shimma, H. Nagao,

- A.E. Giannakopoulos [et al.] // Journal of mass spectrometry. – 2008. – № 43 – Pp. 535-537.
165. Design of a new multi-turn ion optical system “IRIS” for a time-of-flight mass spectrometer [Text] / M. Nishiguchi, Y. Ueno, M. Toyoda [et al.] // Journal of mass spectrometry. – 2009. – № 44. – Pp. 594-604.
166. Анализ твёрдых веществ на времяпролётном масс-спектрометре с лазерным источником ионов [Текст] / Г.Г. Девярых, Н.В. Ларин, Г.А. Максимов [и др.] // Журнал аналитической химии. – 1974. – Т. 29, вып. 8. – С. 1515-1520.
167. Механизмы ускорения ионов в плазме вакуумного искрового разряда [Текст] / Г.И. Рамендик, А.А. Сысоев, В.А. Олейников [и др.] // Письма в ЖТФ. – 1979. – Т. 5, вып. 19. – С. 1203-1206.
168. Разрешающая способность и измерение распространённости изотопов в масс-спектрометре с лазерным источником ионов [Текст] / В.И. Дымович, Ю.П. Козырев [и др.] // ЖТФ. – 1970. – Т. 40, вып. 11. – С. 2401-2404.
169. Родин, Д.В. Пылеударный масс-спектрометр для определения элементного состава микрометеоритов и частиц космического мусора [Текст] / Д.В. Родин, И.В. Пияков // Вестн. СГАУ. – 2011. – № 5 (24). – С. 47-54.
170. Бортовой пылеударный масс-спектрометр для исследования элементного состава микрометеороидов [Текст] / Н.Д. Семкин, Д.В. Родин, И.В. Пияков [и др.] // Научное приборостроение. – 2012. – Т. 22. – № 3. – С. 13-20.
171. Austin, D.E. Dustbuster: a compact impact-ionization time-of-flight mass spectrometer for in situ analysis of cosmic dust [Text] / D.E. Austin, T.J. Ahrens, J.L. Beauchamp // Review of scientific instruments. – 2002 – V. 73. – No. 1. – P. 185-189.
172. Hypervelocity microparticle impact studies: simulating cosmic dust impacts on the Dustbuster [Text] / D.E. Austin, H.L.K. Manning, C.L. Bailey [et al.] // Proceedings of “Lunar and planetary science conference XXXIII”. – Texas. – 11 – 15.03.2002.
173. Hypervelocity microparticle impact studies using a novel cosmic dust mass spectrometer [Text] / D.E. Austin, H.L.K. Manning,

- C.L. Bailey [et al.] // Journal of geophysical research. – 2003. – V. 108. – No. E5, 5038. – P. 1-14.
174. Austin, D.E. A miniature mass spectrometer for high-flux cosmic dust analysis [Text] / D.E. Austin, H.L.K. Manning, J.L. Beauchamp // Proceedings of “Lunar and planetary science conference XXXVIII”. – 12-16.03.2007. – Texas.
175. The large area mass analyzer (lama) for in-situ chemical analysis of interstellar dust particles [Text] / Z. Sternovsky, K. Amyx, G. Bano [et al.] // Proceedings of “Dust in planetary systems”. – 26-30.09.2005– Hawaii.
176. Performance of an advanced dust telescope [Text] / R. Srama, M. Rachev, A. Srowing [et al.] // Proceedings of the forth European conference on space debris .– 18-20.04.2005. – Darmstadt.
177. Mass spectrometry of hyper-velocity impacts of organic micrograins [Text] / R. Srama, W. Woiwode, F. Postberg [et al.] // Rapid communications in mass spectrometry. – 2009. – № 23. – P. 3895-3906.
178. Ahrens, T.J. Mass spectrometer calibration of cosmic dust analyzer [Text] / T.J. Thomas, S.C. Gupta, G. Jyoti // Journal of geophysical research. – 2003. – Vol. 108, no. E2, 5007. – P. 1-10.
179. The Cassini cosmic dust analyzer [Text] / R. Srama, T.J. Ahrens, N. Altobelli [et al.] // Space science reviews. – 2004. – № 114. – P. 465-518.
180. Time-of-flight mass spectra of ions in plasmas produced by hypervelocity impacts of organic and mineralogical microparticles on a cosmic dust analyzer [Text] / B.J. Goldsworthy, M.J. Burchell, M.J. Cole [et al.] // Astronomy & astrophysics. – 2003. – № 409. – P/ 1151-1167.
181. Dust astronomy with a dust telescope [Text] / R. Srama, M. Rachev, A. Srowing [et al.] // Proceeding of the 37th ESLAB symposium “Tools and technologies for future planetary exploration”. – April 2004. – Noordwijk.
182. DuneXpress [Text] / E. Grün, R. Srama, N. Altobelli [et al.] // Experimental astronomy. – 2009. – Vol. 23, issue 3. – P. 981-999.
183. Пат. 2122257 Российская Федерация, МПК Н 01 J 49/40. Пылеударный масс-спектрометр [Текст] / Н.Д. Семкин, К.Е. Воронов; заявитель и патентообладатель Самарский госу-

- дарственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева. – № 96103268/09; заявл. 20.02.1996; опубл. 20.11.1998, Бюл. № 32. – 18 с.
- 184.Новиков, Л.С. Масс-спектрометрия ионов, эмитируемых при соударении микрометеорных частиц с материалами [Текст] / Л.С. Новиков, Н.Д. Сёмкин, В.С. Куликаускас // Физика и химия обработки материалов. – 1989. – №6.
- 185.Газопылеударный масс-спектрометр [Текст] / Н.Д. Сёмкин, К.Е. Воронов, С.В. Мясников [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2001. – №5. – С. 24-32.
- 186.Сёмкин, Н.Д. Детектор микрометеороидных и техногенных частиц [Текст] / Н.Д. Сёмкин, К.Е. Воронов, С.В. Ротов // Измерительная техника. – 1999. – №8. – С. 3-10.
- 187.Расширение энергетического диапазона фокусируемых ионов во времяпролетном масс-спектрометре [Текст] / В.П. Глащенко, Н.Д. Сёмкин, А.А. Сысоев [и др.] // ЖТФ. – 1985. – Т.55, вып. 5 – С. 904-906.
- 188.Сёмкин, Н.Д. Исследование характеристик пылевых частиц с помощью электростатического ускорителя [Текст] / Н.Д. Сёмкин. – Деп. в ВИНТИ – 1987, № 6709 – В87. – 48 с.
- 189.Characterization of kinetic energy distributions of ions in high laser irradiance via orthogonal time-of-flight mass spectrometry [Text] / Y. Lin, M. He, W. Hang [et al.] // Spectrochimica Acta. – 2012. – Part B, No 76. – P. 197-202.
- 190.Krása, J. Gaussian energy distribution of fast ions emitted by laser-produced plasmas [Text] / J. Krása // Applied surface science. – 2013. –No 272. – P. 46-49.
- 191.Post-source decay and delayed extraction in matrix-assisted laser desorption/ionization-reflectron time-of-flight mass spectrometry. Are there trade-offs? [Text] / R. Kaufmann, P. Chaurand, D. Kirsch [et al.] // Rapid communications in mass spectrometry. – 1996. – Vol. 10. – P. 1199-1208.
- 192.Yoon, S.H. A comparative study of in- and post-source decays of peptide and preformed ions in matrix-assisted laser desorption ionization time-of-flight mass spectrometry: effective temperature and matrix effect [Text] / S.H. Yoon, J.H. Moon, M.S. Kim

- // Journal of American society for mass spectrometry. – 2010. – No 21. – P. 1876-1883.
193. Juhasz, P. On the initial velocity of ions generated by matrix-assisted laser desorption ionization and its effect on the calibration of delayed extraction time-of-flight mass spectra [Text] / P. Juhasz, M.L. Vestal, S. A. Martin // Journal of American society for mass spectrometry. – 1997. – No 8. – P. 209-217.
194. Vestal, M.L. Resolution and mass accuracy in matrix-assisted laser desorption ionization-time-of-flight [Text] / M.L. Vestal, P. Juhasz // Journal of American society for mass spectrometry. – 1998. – No 9. – P. 892-911.
195. Stoeckli, M. Automated mass spectrometry imaging with a matrix-assisted laser desorption ionization time-of-flight instrument [Text] / M. Stoeckli, T. B. Farmer, R.M. Caprioli // Journal of American society for mass spectrometry. – 1999. – No 10. – P. 67-71.
196. Ioanoviciu, D. Linear time-of-flight mass spectrometers: postsource pulse focusing conditions and mass scale [Text] / D. Ioanoviciu // Journal of American society for mass spectrometry. – 1995. – № 6. – P. 889-891.
197. Kovtoun, S.V. Mass-correlated pulsed extraction: theoretical analysis and implementation with a linear matrix-assisted laser desorption/ionization time of flight mass spectrometer [Text] / S.V. Kovtoun, R.J. Cotter // Journal of American society for mass spectrometry. – 2000. – № 11. – P. 841-853.
198. Laser ablation mass spectrometer (LAMS) as a standoff analyzer in space missions for airless bodies [Text] / X. Li, W.B. Brinckerhoff, G.G. Managadze [et al.] // International journal of mass spectrometry. – 2012. – No. 323-324. – P. 63-67.
199. Miniature time-of-flight mass spectrometers for in situ composition studies [Text] / W.B. Brinckerhoff, T.J. Cornish, R.W. McEntire [et al.] // Acta Astronautica. – 2003. – No.52. – P. 397-404.
200. Сысоев, А.А. Введение в масс-спектрометрию [Текст] / А.А. Сысоев, М.С. Чупахин. – М.: Атомиздат, 1977. – 304 с.

Учебное издание

Семкин Николай Данилович

**ГАЗОПЫЛЕВАЯ АТМОСФЕРА КОСМИЧЕСКИХ
АППАРАТОВ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА
ЕЕ КОНТРОЛЯ**

Учебное пособие

Редактор Т.К. Кр е т и н и н а
Доверстка Л.Р. Д м и т р и е н к о

Подписано в печать 15.06.2016. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 15,75.

Тираж 100 экз. Заказ . Арт. 23/2016.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени академика С.П. КОРОЛЕВА»
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского университета. 443086 Самара, Московское шоссе, 34.