

Результаты разработки и внедрения метода многопорционного весового дозирования для заправки баков разгонных блоков «Фрегат» в Гвианском космическом центре

В. Г. БОРИСОВ¹, В. М. ШУЛЬГА¹, А. Г. ЛЕБЕДЕВ¹, О. Е. ДЕНИСОВ¹, А. Н. СОВА²

¹ Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры, Москва, Россия,
e-mail: ovio@kbtkm.ru

² Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

Представлены результаты применения метода многопорционного весового дозирования для заправки баков разгонных блоков «Фрегат» в Гвианском космическом центре. Разработаны оборудование и программно-алгоритмический комплекс для реализации данного метода. Экспериментально доказана возможность заправки баков разгонных блоков с погрешностью 0,04—0,08 %. На созданном оборудовании в период 2009—2015 гг. проведено 11 успешных заправок.

Ключевые слова: Гвианский космический центр, программа «Союз в ГКЦ», заправка, разгонный блок, метод многопорционного весового дозирования.

Many portions metering method of fulfilment of fuel tanks of upper stage rocket «Fregat» in Centre Spatial Guyanais was developed. Equipment and software tools developed for implementation of the method. Experimentally proved ability of fulfilment with discrepancy at a level of 0,04—0,08 %. It were realized 11 successful fueling with usage of developed equipment within the period of 2009 to 2015 year.

Key words: Centre Spatial Guyanais, Soyuz in the Centre Spatial Guyanais, fulfilment, upper stage rocket «Fregat», many portions metering method.

История вопроса и постановка задачи. В рамках Российско-Европейского проекта «Союз» в Гвианском космическом центре» (далее — «Союз в ГКЦ») были разработаны и применены новые подходы к заправке баков разгонных блоков (РБ) компонентами топлива. Традиционно существующие в Российской Федерации методы заправки баков РБ основаны, как правило, на методах весового дозирования, реализуемых с помощью стационарно установленных на заправочной станции дозаторов.

Заправку баков РБ «Фрегат» в ГКЦ необходимо производить в чистовом зале заправки, в котором нельзя устанавливать стационарное оборудование. В связи с этим было решено заправлять баки РБ с помощью мобильного оборудования, состоящего из транспортно-заправочных контейнеров (ТЗК), платформенных весов и комплекта заправочного оборудования (щитов выдачи, газовых щитов, вакуумного оборудования). Заправку предполагалось осуществлять непосредственно из ТЗК, установленного на платформу весов. Отличительной чертой такой технологии заправки является то, что компонент топлива с заданной чистотой и газосодержанием подготавливается в Российской Федерации и поставляется в ГКЦ.

Данную технологию удалось разработать и в полной мере реализовать в случае заправки баков РБ гидразином. Для этого использовали ТЗК (производство фирмы Astrium) объемом 250 л и весы типа KD-600 HR (производство фирмы Mettler-Toledo). Работа весов основана на использовании К-ячейки, функционирующей по принципу электромагнитной компенсации, что обеспечивает высокую точность измерений: погрешность весов равна ± 40 г при нагрузках до 150 кг и ± 80 г в диапазоне нагрузок 150—600 кг.

Однако такую технологию при заправке основных баков РБ горючим и окислителем реализовать не удалось, так как эти компоненты топлива поставляются в ГКЦ в ТЗК объемом 3,8 м³. Масса брутто с окислителем такого ТЗК равна 8500 кг, поэтому для заправки баков требуются весы с максимальной нагрузкой 10 т. Подобрать весы, обеспечивающие требуемую точность заправки баков РБ, не удалось. Поэтому было принято решение о разработке системы заправки, основанной на методе многопорционного весового дозирования.

Работы, проводимые в рамках программы «Союз в ГКЦ», позволили отработать основные технологические операции, в частности, по подготовке и транспортировке компонента в ТЗК, что создало основу для внедрения новой технологии в практику российских космодромов и определило облик строящихся заправочно-нейтрализационных станций [1].

Метод многопорционного весового дозирования и измерительная схема. Суть метода заключается в следующем: из заправочной ёмкости, установленной на весах, в бак РБ по показаниям весов выдается порция компонента топлива. Далее заправочная ёмкость заполняется из ёмкости для хранения и подготовки компонента топлива, выдается следующая порция компонента топлива в бак РБ. Процесс повторяется до тех пор, пока суммарная масса порций не станет равной массе заданной дозы.

Для реализации данного метода созданы измерительная схема и программно-алгоритмический комплекс, которые определили облик системы заправки. На рис. 1 приведена схема заправки, поясняющая метод многопорционного весового дозирования.

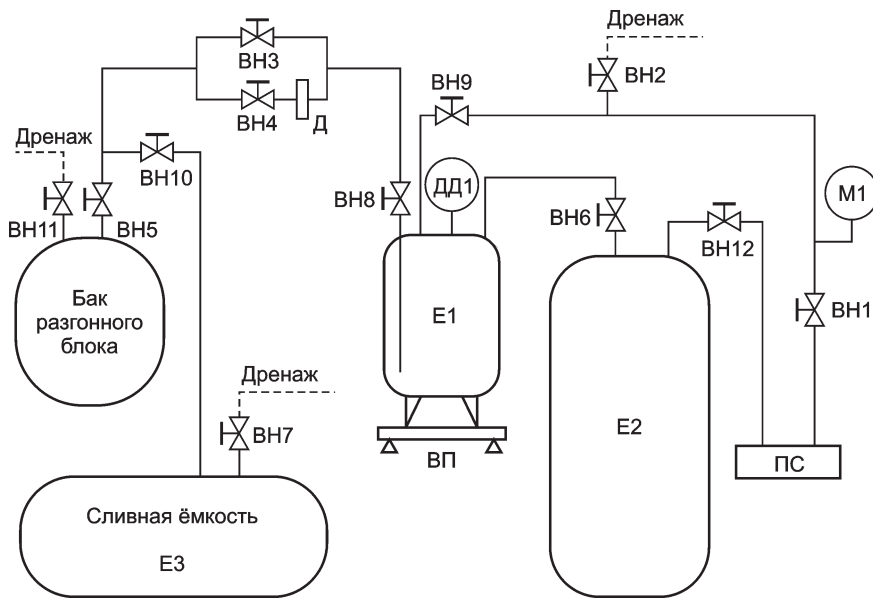


Рис. 1. Условная схема заправки и испытаний:

ПС — пневматическая система; $E1$, $E3$ — заправочная и сливная ёмкости, соответственно; $E2$ — ёмкость для хранения и подготовки компонента; $ВН1$ — $ВН12$ — вентили; $M1$ — манометр; $ДД1$ — датчик давления; $Д$ — дюза (диафрагма с калибровочным отверстием для обеспечения заправки на малом расходе компонента топлива); $РБ$ — разгонный блок; $ВП$ — весовая платформа

Основными элементами системы заправки являются: пневматическая система $ПС$, предназначенная для создания рабочего давления; ёмкость $E2$ для хранения и подготовки компонента топлива по температуре и газосодержанию ($ТЗК$, $V = 3,8 \text{ м}^3$); заправочная ёмкость $E1$ ($ТЗК$, $V = 250 \text{ л}$); весовая платформа $ВП$; сливная ёмкость $E3$, предназначенная для приёма компонентов топлива при выполнении операции пролива ($ТЗК$, $V = 250 \text{ л}$); система клапанов $ВН1$ — $ВН12$ для коммутации технологических операций; дюза $Д$, обеспечивающая малый расход; датчик давления $ДД1$; дренажная система для сбора и нейтрализации паров компонентов топлива.

Заправочная ёмкость $E1$ установлена на весовую платформу. В верхней части ёмкости размещены датчик давления $ДД1$ и клапан $ВН9$, к которому подведена пневматическая магистраль, предназначенная для подачи вытесняющего газа. Гидравлическая магистраль с клапаном $ВН8$ служит для выдачи компонентов топлива. С помощью отсечных клапанов $ВН3$, $ВН4$ большого и малого расходов выполняют операции запуска и остановки процесса выдачи дозы, а также заполнения и пролива магистралей. Клапан $ВН4$, включённый последовательно с дюзой, необходим при завершении дозирования для выдачи компонентов топлива малым расходом. Клапан $ВН5$ — запорный клапан на баке $РБ$. Для пролива магистралей используют клапан $ВН10$ и ёмкость $E3$. Для создания давления в ёмкости $E2$ применяют клапан $ВН12$, а для заполнения заправочной ёмкости $E1$ — клапан $ВН6$. Клапан $ВН1$ является частью пневматической системы и служит для подачи вытесняющего газа всем потребителям, участвующим в заправке. Манометр $M1$ используется для контроля давления подачи газа. Связь с системой дренажа для ёмкостей и бака изделия обеспечивают клапаны $ВН2$, $ВН7$, $ВН11$.

Заполнение заправочной ёмкости и выдачу порции компонента топлива в бак $РБ$ производили вытеснением компонента топлива гелием под давлением порядка $0,35 \text{ МПа}$, а противодействие в баках $РБ$ поддерживалось на уровне $0,30 \text{ МПа}$.

Функциональная электрическая схема весоизмерительной системы приведена на рис. 2.

Измерительная схема включает в себя весовую платформу $ВП$ (весы типа $KD-600X$), весовой терминал $ВТ$ (типа $IND 690$), оптические преобразователи $П1$, $П2$, промышленный компьютер $ПК$, принтер, блок питания $БП$ табло и два двухрядных цифровых табло «Выдача» и «Приём». Весовая платформа и цифровые табло размещены в зале заправки (зона $АТЕХ$), а весовой терминал, преобразователь $П1$ и блок питания табло — во взрывобезопасном помещении щитовой (рядом с залом заправки). Стойка управления находится в отдельном сооружении, расположенном на расстоянии 600 м от зала заправки.

Весовая платформа, на которую устанавливают заправочную ёмкость, вырабатывает цифровой сигнал, пропорциональный массе приложенной нагрузки. Сигнал поступает на вход весового терминала, где преобразовывается в единицы массы. Выходной сигнал весового терминала через преобразователи $П1$, $П2$ и оптоволоконный кабель поступает на вход промышленного компьютера.

Управление заправкой производится с помощью промышленного компьютера в соответствии с разработанным программно-алгоритмическим комплексом.

Выполняются следующие операции: «Тест аппаратуры», «Ввод параметров», «Приём компонентов топлива и заполнение коммуникаций», «Пролив коммуникаций», «Контрольная выдержка № 1», «Заправка», «Контрольная выдержка № 2», «Просмотр и печать результатов».

Рассмотрим основные этапы технологии заправки баков $РБ$.

В память промышленного компьютера вводят параметры заправки (операция «Ввод параметров»): массу M_d заданной дозы и массу M_n поправки на вытесняющий газ. Промышленный компьютер вычисляет скорректированную массу дозы, которую необходимо выдать по показаниям весов: $M_d^* = M_d - M_n$.

При выполнении операции «Заправка» определяются количество и масса порций, а также масса компонента топлива в ёмкости, до значения которой необходимо заполнять ёмкость перед началом выдачи порции. Информация об этой массе индицируется в верхнем ряду табло «Приём», а текущее значение массы — в нижнем ряду. Оператор открывает клапаны на заполнение и по показаниям табло контролирует поступление компонентов топлива в ёмкость. Когда масса принятого компонента по показаниям нижнего ряда индикаторов достигает заданного уровня (значений верхнего ряда), оператор закрывает клапаны. Затем промышленный компьютер выдает команду на выдачу порции. Для всех порций, кроме последней, в верхнем ряду индикаторов табло «Выдача» отображается текущая масса компонента, а в нижнем ряду — значение массы, по достижении которой необ-

ходимо закрыть вентили. Масса первой порции взвешивается в статическом режиме, далее аналогично выдаются еще $n-2$ порций, где n — общее количество порций.

При выдаче $n-1$ порций не требуется производить точную отсечку, поскольку после взвешивания каждой порции промышленный компьютер корректирует массу оставшихся порций. Последнюю порцию необходимо отсекать точно, переходя на малый расход. Масса $n-1$ порций определяется при статическом взвешивании, что подтверждает высокую точность метода.

При выдаче последней порции в верхнем ряду табло «Выдача» индицируется значение массы остатка компонента до завершения дозирования, а в нижнем ряду — нуль. Оператор производит выдачу порций компонентов топлива в бак до тех пор, пока показание верхнего ряда табло не достигнет значения нижнего ряда. Обозначим показания верхнего ряда табло после окончания дозирования как I_k .

Если $I_k > 0$ — доза по показаниям весов выдана меньше на I_k ; $I_k = 0$ — доза по показаниям весов выдана точно; $I_k < 0$ — доза по показаниям весов выдана больше на I_k . Таким образом, I_k является погрешностью отсечки дозы $\Delta_{от}$ и определяется в основном действиями оператора, закрывающего отсечные вентили. По окончании дозирования промышленный компьютер распечатывает результаты заправки:

массу заданной дозы M_d ; массу дозы $M_d^* - I_k$, выданной по показаниям весов, т. е. погрешность отсечки дозы автоматически входит в результат; массу дозы, выданной в бак РБ:

$$M_{д.и} = M_d^* - I_k + M_{п.г} = M_d - I_k.$$

Результат дозирования должен быть записан в виде $M_{д.и} \pm \Delta_b$, где Δ_b — предел допускаемой погрешности взвешивания дозы.

Во время выполнения операций программное обеспечение реализует наглядное графическое представление процесса заправки, также ведётся журнал заправки, в котором в режиме реального времени фиксируются показания приборов и действия оператора, записываются на жёсткий диск и флэш-память масса выданных порций и текущее значение массы выдаваемой порции.

Оценка погрешности метода. Допускаемая абсолютная погрешность выдачи дозы горючего и окислителя в основные баки маршевых двигательных установок обусловлена погрешностями взвешивания выданной дозы и отсечки дозы: $\Delta_d = \Delta_{в.д} + \Delta_{от}$. Погрешность отсечки $\Delta_{от}$ при каждой заправке определяется экспериментально и входит в результат дозирования. Значение $\Delta_{от}$ оценено на основе статистического анализа многочисленных экспериментов при отработке метода и при проведении реальных заливок. Для системы с выбранным типом весов погрешность $\Delta_{от}$ не превышает $\pm 0,02$ кг и является пренебрежимо малой, поэтому можно записать

$$\Delta_d = \Delta_{в.д}. \quad (1)$$

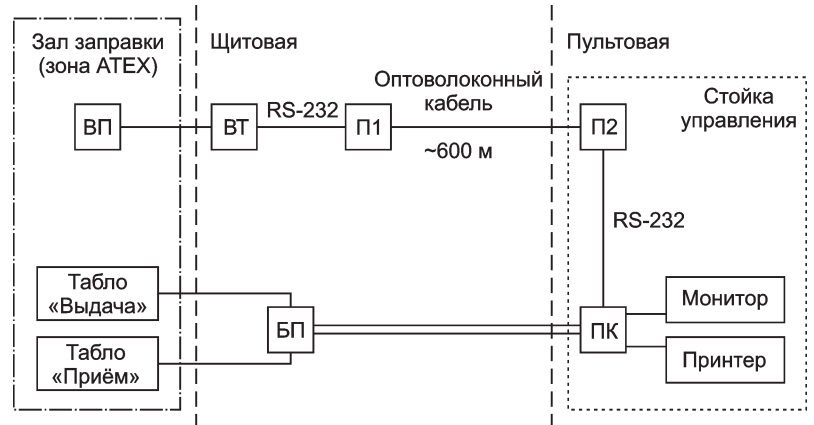


Рис. 2. Схема весоизмерительной системы:

ВП — весовая платформа; ВТ — весовой терминал; П1, П2 — оптические преобразователи; ПК — промышленный компьютер; БП — блок питания

Погрешность взвешивания выданной дозы можно записать в виде

$$\Delta_{в.д} = n (\Delta_b + \Delta_{пол} + \Delta_{ш}) + \Delta_r, \quad (2)$$

где Δ_b — предел допустимой погрешности взвешивания на весах КД-600 HR; $\Delta_{пол}$ — уход показаний нагруженных весов КД-600 HR за время выдачи порции компонента топлива ($t \approx 0,5$ ч) (ползучесть); $\Delta_{ш}$ — погрешность, обусловленная шунтирующим воздействием подключенных трубопроводов; Δ_r — погрешность, обусловленная неточностью расчёта поправки на массу вытесняющего газа.

Основной вклад в погрешность Δ_d вносит первый член $n\Delta_b$ (см. (2)). Поскольку масса пустого ТЗК превышает 150 кг, абсолютную погрешность взвешивания каждой порции следует принимать равной $\Delta_b^i = \pm 0,08$ кг.

Погрешность, обусловленную шунтирующим влиянием трубопроводов, определяли методом контрольных погружений весов с установленным ТЗК как без подключённых трубопроводов, так и с трубопроводами с избыточным давлением гелия. В пяти проведённых последовательно экспериментах разница в показаниях весов в трёх случаях составила 0,01 кг, в двух случаях показания совпали. Таким образом, $\Delta_{ш} = 0,01$ кг. Погрешность ухода показаний нагруженных весов за 0,5 ч не превысила значения действительной цены деления, т. е. $\Delta_{пол} = 0,01$ кг.

При вытеснении компонента топлива гелием поправка на массу вытесняющего газа $M_{п.г}$ мала и составляет порядка 0,05—0,10 % массы дозы. Соответственно, погрешность определения поправок является пренебрежимо малой. Расчёты, выполненные при разработке метода, показали, что Δ_r не превышает 0,001 % массы дозы, и ей можно пренебречь.

Таким образом, с учётом равенства (1) запишем

$$\Delta_d = n (\Delta_b + \Delta_{пол} + \Delta_{ш}).$$

Относительную погрешность вычислим по формуле

$$\delta_d = (\Delta_d / M_d) \cdot 100.$$

Таблица 1

Результаты контрольных погружений весов УВФД-5

Масса гирь, кг	Показания весов при погружении, кг	
	до испытаний	после испытаний
0	0	0
200	200,0	200,0
400	400,1	400,1
600	600,0	600,1
800	800,0	800,1
1000	1000,1	1000,2

При заправке баков РБ «Фрегат» за восемь порций выдаются дозы 1000 кг горючего и 2000 кг окислителя. Погрешности выдачи доз в этом случае не превышают значений $\Delta_d^r = \pm 0,8$ кг или 0,08 % для горючего, $\Delta_d^o = \pm 0,8$ кг или 0,04 % для окислителя.

При расчёте использовали паспортное значение погрешности весов. Поскольку в ГКЦ

весы юстируются перед заправкой, значение Δ_b может быть уменьшено до 0,03 кг, в этом случае можно достигнуть следующих значений погрешности выдачи дозы: $\Delta_d^r = \pm 0,4$ кг или

0,04 % для горючего; $\Delta_d^o = \pm 0,4$ кг или 0,02 % для окислителя.

Полученные результаты согласуются с результатами проведённых экспериментов. Для реализации такого подхода необходимо в соответствии с [3] разработать и аттестовать в установленном порядке методику измерений.

Экспериментальная отработка метода многопорционного дозирования. Для экспериментальной отработки метода многопорционного дозирования был собран испытательный стенд. В качестве заменителя компонента топлива использовали воду. Схемы стенда аналогичны схемам, приведенным на рис. 1, 2, только вместо изделия (см. рис. 1) — контрольная ёмкость, а в весоизмерительной схеме (см. рис. 2) нет преобразователей П1, П2 и оптоволоконного кабеля.

При экспериментальной отработке заданные дозы воды выдавали в контрольную ёмкость, установленную на контрольных весах. В качестве контрольных весов для небольших доз использовали также весы KD-600 HR, а для больших доз — весы УВФД-5 [2], на которых была установлена ёмкость объёмом 3 м³.

Перед проведением экспериментов весы юстировали и проводили контрольное погружение. Фактическая погрешность весов KD-600 HR (как рабочих, так и контрольных) не превышала ± 20 г в диапазоне нагрузок 0—600 кг. Весы УВФД-5, имеющие максимальную нагрузку 5000 кг, юстировали в ограниченном диапазоне нагрузок 0—1000 кг. Перед началом и после окончания испытаний проводили контрольные погружения весов, результаты которых приведены в табл. 1. При юстировке и испытаниях использовали уменьшенную действительную цену деления, равную 0,1 кг.

Фактическая погрешность УВФД-5 в диапазоне нагрузок 0—1000 кг не превышает $\pm 0,2$ кг, что существенно меньше паспортной погрешности УВФД-5.

Экспериментально метод отработывали при выдаче доз 200 и 1000 кг. Дозы 200 кг выдавали за 8 порций в контрольную ёмкость $V = 250$ л, установленную на весах KD-600 HR. Порции выдавали при постоянной массе воздуха в заправочной ёмкости (ТЗК $V = 250$ л), поэтому поправку на массу вытесняющего воздуха не вводили. Было выдано 6 доз по 200 кг, результаты представлены в табл. 2. За погрешность выдачи дозы принимали разность между заданной дозой и показаниями контрольных весов с учётом поправки на массу воздуха. Погрешность находится в пределах $-0,01...+0,03$ кг.

Дозы массой 1000 кг выдавали за 13 порций (см. табл. 2). Погрешность выдачи доз лежит в диапазоне $\pm 0,2$ кг, что находится в пределах погрешности контрольных весов и соответствует погрешности УВФД-5. Доза 1000 кг соответствует дозе горючего, заправляемого в баки РБ «Фрегат». Результаты показывают, что метод и оборудование обеспечивают погрешность заправки таких доз на уровне $\pm 0,02$ % массы дозы.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований

Тип контрольных весов	Номер дозы	Доза по показаниям весов KD-600, кг	Поправка на воздух в ТЗК, кг	Выданная доза с учётом поправки, кг	Показания контрольных весов, кг	Поправка на воздух в контрольной ёмкости, кг	Принятые дозы с поправкой, кг	Погреш- ность, кг
KD-600 HR	1	200,02	0,00	200,02	199,79	0,24	200,03	+0,03
	2	200,00	0,00	200,00	199,78	0,24	200,02	+0,02
	3	200,01	0,00	200,01	199,78	0,24	200,02	+0,02
	4	199,98	0,00	199,98	199,75	0,24	199,99	-0,01
	5	200,01	0,00	200,01	199,78	0,24	200,02	+0,02
	6	200,00	0,00	200,00	199,76	0,24	200,00	0,00
УВФД-5	7	994,60	5,40	1000,00	998,80	1,20	1000,00	0,00
	8	994,59	5,40	999,99	998,80	1,20	1000,00	0,00
	9	994,62	5,40	1000,02	998,90	1,20	1000,10	+0,10
	10	994,35	5,64	999,99	999,00	1,20	1000,20	+0,20
	11	994,36	5,64	1000,00	998,90	1,20	1000,10	+0,10
	12	994,34	5,64	999,98	999,00	1,20	1000,20	+0,20

Экспериментальная погрешность меньше расчётной погрешности метода, что объясняется проведённой перед экспериментами юстировкой рабочих весов KD-600 HR. Юстировка была сделана сознательно, поскольку в практике ГКЦ принято перед заправкой производить контрольное погружение весов, при необходимости — юстировку, и затем — калибровку, которую проводит метрологическая служба космодрома.

При испытаниях каждую дозу 1000 кг выдавали за 13 порций. В системе заправки на космодроме КУРУ в качестве заправочной ёмкости используется ТЗК V = 250 л, возможно это позволит выдавать каждую дозу горючего (или окислителя) за 8 порций и уменьшить погрешность выдачи дозы.

Заключение. Система заправки в ГКЦ, реализующая разработанный метод многопорционного весового дозирования, обеспечивает заправку баков РБ «Фрегат» с погрешностью, не превышающей 0,04 и 0,08 % выдаваемой дозы для окислителя и горючего, соответственно. Юстировка весов

перед заправкой может позволить дополнительно уменьшить погрешность заправки. В период 2009—2015 гг. в ГКЦ было проведено 11 успешных заправочных кампаний.

Л и т е р а т у р а

1. Бантыш И. В., Денисов О. Е., Дмитриев Ю. А., Лебедев А. Г., Назаров В. М., Шульга В. М. Компарирование как метод заправки космических аппаратов малыми дозами компонентов топлива // Приборы. 2015. № 1. С. 20—25.

2. Устройства весоизмерительные с функцией дозирования УВФД. Сертификат об утверждении типа RU.C.28004.A № 18146, зарегистрирован в государственном реестре средств измерений под № 27296-04.

3. ГОСТ Р 8.563—2009. ГСИ. Методики (методы) измерений.

Дата принятия: 01.03.2017.

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.373.826

Калибровка матричных фотоприёмников и прецизионное позиционирование объектов по растровым изображениям

Г. Г. ЛЕВИН¹, В. Л. МИНАЕВ¹, Я. А. ИЛЮШИН^{2, 3}, В. Г. ОШЛАКОВ⁴

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: minaev@vniiofi.ru

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

⁴ Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

Рассмотрена задача определения малого перемещения объекта по серии изображений в интерференционном микроскопе. Оценена степень влияния фазовых шумов восстановления когерентной структуры поля. Исследовано влияние неоднородности индивидуальных пикселей матричного фотоприёмника растрового изображения.

Ключевые слова: сверхразрешение, субпиксельное разрешение, матричный фотоприёмник, микроскоп, растр.

The problem of determination of small displacement of the object on the series of microscopic interferometric images is considered. Degradation of coherent image restoration from phase noise is estimated. Impact of the calibration errors of individual pixels of image registering matrix is investigated.

Key words: super-resolution, sub-pixel resolution, photodetector array, microscope, raster image.

Задача прецизионного позиционирования объекта по растровому изображению актуальна для целого ряда приложений, например при производстве и контроле различных изделий микроэлектронной промышленности [1], обработке изображений ориентиров и источников света в системах ориентирования и навигации летательных аппаратов, судов и других транспортных средств [2, 3], обработке дискретизированной информации любого типа (сигналов, временных рядов и т. д.), в фотограмметрии [4]. В ряде случаев не-

обходимо достижение позиционирования с субпиксельным разрешением — определение расположения отдельных элементов и структур растровых изображений, а также взаимного позиционирования нескольких изображений с погрешностью не более размера единицы раstra изображения (пиксела). Для решения таких задач разработано множество разнообразных алгоритмов субпиксельного позиционирования [5].