

УДК 533.6.011

**ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ
КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ.
ЧАСТЬ 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ
УСТРОЙСТВ***

**В.Н. ЯРЫГИН¹, В.Г. ПРИХОДЬКО¹, И.В. ЯРЫГИН¹, Ю.И. ГЕРАСИМОВ²,
А.Н. КРЫЛОВ²**

¹*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

²*РКК Энергия им. С.П. Королева, Королев*

Представлены результаты экспериментальных и численных исследований различных схем газодинамических защитных устройств, предназначенных для установки на двигатели ориентации космических аппаратов с целью уменьшения обратных потоков загрязняющих фракций.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья является, в известной мере, продолжением работ [1, 2], посвященных решению проблемы внешнего загрязнения космических аппаратов и космических станций струями двигателей ориентации. Было показано [1], что основным загрязняющим фактором являются сгоревшие и несгоревшие, в том числе капельные, фракции топлива, выбрасываемые из сопла в окружающее пространство практически в полную сферу — от 0 до 180° относительно оси струи. Одним из способов защиты конструктивных элементов космических аппаратов от физико-химического воздействия струй двигателей является постановка защитных устройств вокруг сопел двигателей. Работа посвящена анализу схем и исследованию эффективности защитных устройств с точки зрения пространственного ограничения загрязняющих потоков.

СХЕМЫ ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ

Схемные и конструктивные решения защитных устройств могут быть самыми разными и зависят от ряда факторов [1]. Основные требования, предъявляемые к ним — малый вес, надежная работа в условиях открытого космоса, отсутствие влияния на тяговые характеристики двигателя. Кроме того, необходимо учитывать конструктивные ограничения на сопла двигателей и их компоновку на космическом аппарате. Можно выделить две основные схемы защитных устройств (экранов) — с замкнутой и разомкнутой донной частью (рис. 1). По схеме рис. 1, *a* донная часть экрана герметично соединена с соплом, по схеме рис. 1, *b* в ней имеется зазор (из-за конструктивных ограничений на установку экрана на сопло двигателя). То есть во втором варианте внутренняя полость экрана со стороны донной части полностью или частично соединена с окружающим космическим пространством.

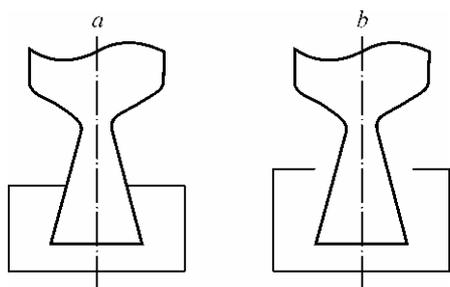


Рис. 1. Принципиальные схемы экранов.
a — замкнутый экран, *b* — разомкнутый экран.

Можно предположить, что установка экрана с разомкнутой донной частью хотя и ограничит поток капельной фазы в области геометрической тени экрана, однако может вызвать увеличение потока капельной (загрязняющей) фазы в обратном направлении (180° относительно оси струи). Для ответа на этот вопрос были проведены сравнительные эксперименты по измерению давления в межэкранном пространстве и обратных потоках капельной фазы для обоих вариантов экранов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты проводились на вакуумной газодинамической установке ВИКИНГ Института теплофизики СО РАН, достаточно подробное описание которой дано в [1].

Конструктивные схемы защитных устройств замкнутого и разомкнутого типа представлены на рис. 2. В форкамеру 1 подавался газ. В режимах истечения газа вместе с жидкостью, последняя подавалась в кольцевой зазор между втулкой и стенкой форкамеры сопла. Экран 4 устанавливался вокруг сопла 5 и образовывал с ним полость, открытую со стороны среза сопла. Трубка 6 соединяла межэкранную полость с датчиком давления. Меняя экраны, можно было изменять угол α между кромками сопла и экрана и осью сопла.

Для измерения давления использовался датчик — тензомодуль давления типа ТДМ2-Д, предназначенный для измерения дифференциального давления газовых неагрессивных сред. Он состоит из кремниевого чувствительного элемента, герметично соединенного с металлическим основанием, в котором по кругу впаяны металlostеклянные электрические выводы. По периферии сверху с основанием герметично соединена крышка. Со стороны выводов герметично впаян штуцер для

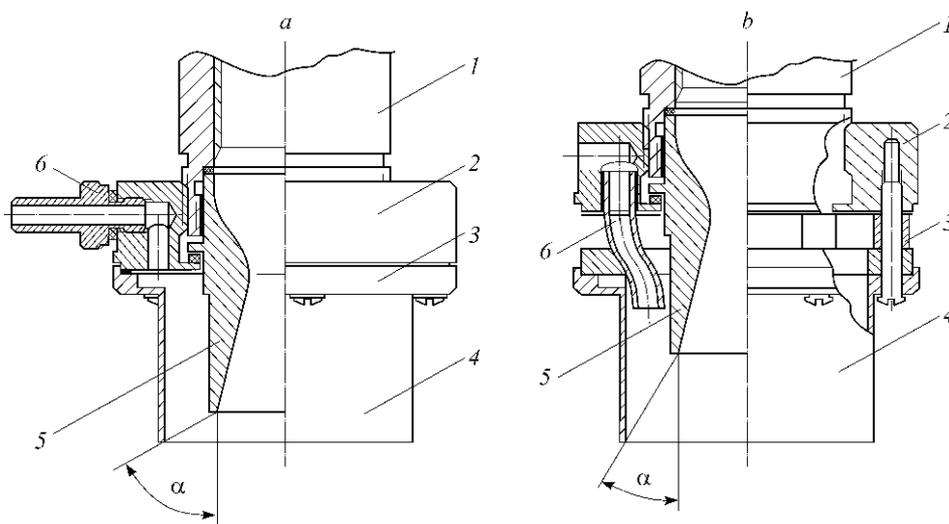


Рис. 2. Конструктивные схемы экранов.

a — замкнутый экран, *b* — разомкнутый экран, 1 — форкамера, 2 — корпус, 3 — фланец, 4 — экран, 5 — сопло, 6 — трубка измерения давления.

подсоединения тензомодуля к объему с опорным давлением. В качестве такого объема использовалась отдельная магистраль, откачиваемая механическим форвакуумным насосом до давления $(1-2) \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. Достоинством датчика являются его миниатюрные размеры, которые обуславливают малую величину постоянной времени, что необходимо для проведения измерений истечения газа из сопла в вакуумную камеру в импульсных режимах, которые использовались в настоящей работе.

Выходной сигнал датчика для диапазона измеряемых давлений составлял несколько милливольт и регистрировался с помощью высокоточного цифрового вольтметра АВМ-4306, соединенного с компьютером. Перед проведением экспериментов проводилась тарировка аппаратуры в стационарном режиме (в покоящемся газе) — регистрировался сигнал датчика ТДМ2-Д при известном постоянном давлении в рабочей камере, которое измерялось емкостным мембранным вакуумметром MKS Baratron Type 626A в комплекте с блоком индикации MKS Type PDR 2000. Диапазон измерения от $2 \cdot 10^{-4}$ до 2 мм рт. ст. при этом погрешность измерений не превышает 0,25%. Давление больше 2 мм рт. ст. вплоть до атмосферного измерялось вакуумметром с емкостным датчиком DVR 5. Его погрешность измерений не хуже 0,1 мм рт. ст. при давлении $\leq 7,5$ мм рт. ст. и не хуже 1 мм рт. ст. при более высоких давлениях. Показания емкостных датчиков не зависят от состава газа, а для наших условий — от того, истекает в камеру только газ или газ вместе с жидкостью.

Тарировочные эксперименты подтвердили очень хорошую линейность зависимости выходного сигнала датчика ТДМ2-Д от измеряемого давления (по паспортным данным $< 0,3\%$). Одновременно с тарировкой датчика ТДМ2-Д проводилась тарировка индуктивного датчика давления ИКД-6ТДА-2000 (диапазон измерений от $2 \cdot 10^1$ до $2 \cdot 10^3$ мм рт. ст.), использовавшегося для измерения давления газа в форкамере сопла. Сигнал от ИКД-6ТДА подавался на АЦП и регистрировался персональным компьютером вместе с выходным сигналом от вольтметра АВМ-4306. Этот же компьютер управлял клапанами подачи газа и жидкости в сопло.

При проведении измерений моделировалось течение за реальным двигателем ориентации Международной космической станции [1]. В экспериментах использовалось коническое сопло с геометрическим числом Маха $M = 3$ и диаметром среза сопла $D_a = 20$ мм; соотношение диаметров экрана и сопла $D_s/D_a = 1,75$. Рабочий газ — воздух подавался от компрессора через буферную емкость из 4-х стандартных 40 литровых баллонов. Средняя величина давления торможения в большинстве экспериментов составляла приблизительно 10 кПа. Эксперименты проводились в импульсных режимах, чтобы обеспечить возможно низкое давление в вакуумной камере при больших расходах газа, не достижимых при работе установки в непрерывном режиме. Продолжительность импульса не превышала 10 секунд. Начальные температуры газа и жидкости были равны комнатным, расход газа составлял около 22 г/с. В качестве рабочей жидкости использовался этанол с расходом около 1 г/с. Во время подачи газа в сопло давление в камере возрастало со скоростью $\approx 5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. в секунду.

Наряду с экспериментальными проводились численные исследования течения газовой фазы в струе за соплом и внутри экрана по методике, изложенной в [1].

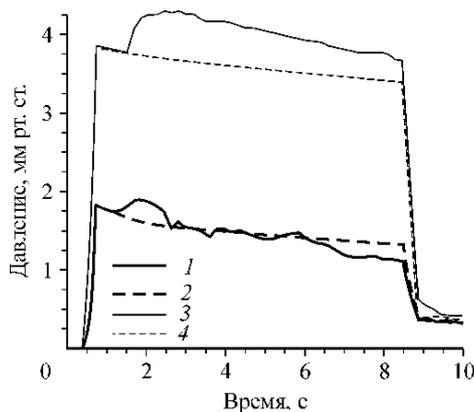


Рис. 3. Измерение давления в межэкранным пространстве.

Экраны: разомкнутый, с жидкостью (1), без жидкости (2), замкнутый, с жидкостью (3), без жидкости (4).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 3 показаны типичные результаты измерения давления в межэкранным пространстве для обоих вариантов экранов. Сплошной линией на этом рисунке показано изменение давления за время импульса при подаче газа

и пристенной пленки жидкости, пунктирной — только газа. Угол α в этих экспериментах был одинаков и равнялся 30° . Как видно из представленных результатов, во время импульса имеет место практически стационарный режим течения. Видно также, что постоянная времени применяемых датчиков давления не превышает 0,25 с, что позволяет надежно регистрировать параметры процесса, продолжающегося больше 1–2 секунд.

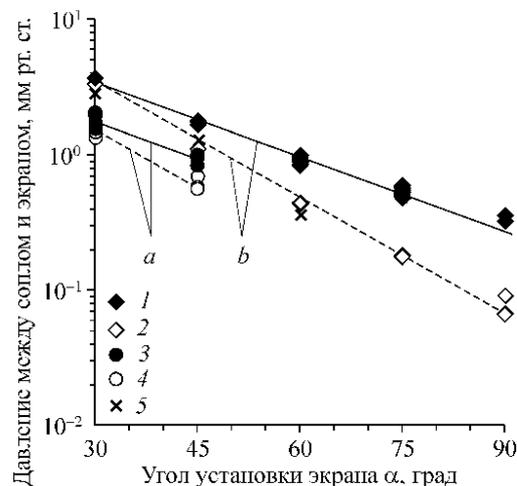
На переднем фронте профилей импульса давления газа в полости между соплом и экраном можно заметить момент установления давления. Появление жидкости в сопле (оно хорошо заметно на профилях) происходит чуть позже этого момента, поскольку задержка связана с приходом жидкости в сопло после открытия запорного клапана. Присутствие жидкости заметно увеличивает давление в полости. Упругие характеристики магистрали жидкости и резкое открытие запорного клапана, вероятно, отражаются на скорости течения жидкости и являются причиной колебательного характера поведения величины давления между соплом и экраном.

Из-за конечного объема буферной емкости в магистрали подачи газа давление торможения P_0 за время импульса несколько падает. Падение P_0 составляет величину не более 10–12%. Момент появления жидкости в сопле можно заметить и по профилям давления газа в форкамере. Если сравнить варианты с подачей жидкости и без нее, то можно заметить, что жидкость увеличивает P_0 на величину порядка величины давления насыщенного пара. Из сравнения приведенных на рис. 3 данных видно, что давление в межэкранным пространстве для разомкнутого экрана ниже, чем для замкнутого (примерно в 2 раза), что связано с истечением газа в вакуумную камеру через кольцевой зазор в донной части разомкнутого экрана.

На рис. 4 представлены результаты измерения давления P_{NS} между соплом и экраном для разных α (разных длин экрана). Можно

Рис. 4. Влияние длины экрана (угла α) на величину давления в межэкранным пространстве.

Экраны: замкнутые — с жидкостью (1), без жидкости (2), без жидкости, расчет (3), эксп.; разомкнутые — с жидкостью (4), без жидкости (5), без жидкости, расчет (6), эксп.



видеть, что увеличение угла α от 30° до 90° существенно, более чем на порядок, уменьшает величину давления в межэкранном пространстве. Видно также, что влияние угла α для обоих вариантов экранов подобны (соответствующие зависимости эквидистантны). Отметим также, что максимальное значение давления в межэкранном пространстве (примерно 3,3 мм рт. ст.) намного меньше расчетной величины статического ($P_a \approx 21,6$ мм рт. ст.) и полного ($P'_0 \approx 260$ мм рт. ст.) давлений в выходном сечении сопла. Это означает, что присутствие такого экрана не должно оказывать заметного влияния на тяговые характеристики сопла.

На этом же рисунке представлено сопоставление экспериментальных и расчетных величин давления в межэкранном пространстве для варианта замкнутого экрана. Можно отметить вполне удовлетворительное согласование результатов эксперимента и расчета. Расчеты также показали, что величина давления в межэкранном пространстве коррелирует как для замкнутого, так и для разомкнутого экранов с величиной скоростного напора в невозмущенной части струи вблизи поверхности экрана в его выходном сечении.

Проведенные эксперименты показали, что для замкнутых экранов с $\alpha = 75^\circ$ и 90° возникает “эжекторный” эффект, когда давление в полости между соплом и экраном остается ниже, чем давление в окружающем пространстве (в вакуумной камере). Повышение давления в вакуумной камере за время импульса уменьшает размеры истекающей струи и в какой-то момент эжекторный эффект исчезает. В проведенных экспериментах это было заметно более для экрана с $\alpha = 90^\circ$, где влияние внешнего давления начинает сказываться на результатах измерений через 3–5 секунд. Следовательно, все результаты измерений при меньших временах моделируют стационарный режим истечения в вакуум (или в космическое пространство). Поэтому при обработке результатов экспериментов учитывались только данные, полученные для стационарного режима. В частности, в экспериментах с одновременной подачей в сопло газа и жидкости за величину давления в полости между соплом и экраном принималось значение измерений, усредненное за интервал времени 1,5–3 секунды, когда параметры потока уже вышли на стационарный режим и еще не подвержены влиянию окружающего давления.

Как показали результаты расчетов, характер взаимодействия истекающего из сверхзвукового сопла газового потока с экраном существенным образом зависит от относительного расположения сопла и экрана (угла α). Иллюстрацией сказанному является рис. 5, на котором приведены результаты расчетов пространственных распределений давления газа в плоскости симметрии для $\alpha = 30, 45$ и 60° для замкнутого экрана. Можно видеть, что для случая $\alpha = 30^\circ$ расширяющийся из сопла поток взаимодействует с боковой поверхностью экрана с образованием скачка уплотнения, интенсивность которого уменьшается по мере удаления от среза экрана. Внутренняя полость экрана изолирована от внешнего пространства, внутри нее реализуется циркуляционное течение, которое на рисунках направленно против часовой стрелки. При $\alpha = 60^\circ$ взаимодействие струи с экраном имеет практически нулевую интенсивность. Это можно видеть также по графикам изменения давления и продольной компоненты скорости вдоль боковых стенок экранов (с продолжением в поле струи), приведенным на рис. 6. На рис. 6, с видно, что при $\alpha = 30^\circ$ газ втекает в полость экрана, а при $\alpha = 60^\circ$ продольная компонента скорости в полости экрана практически равна 0. При положении экрана $\alpha = 45^\circ$ взаимодействие газа со стенкой экрана имеет место, но его интенсивность меньше, чем при $\alpha = 30^\circ$. Наличие циркуляционного течения внутри замкнутого экрана подтверждают также результаты расчетов полей скоростей газа в пространстве между соплом и экраном.

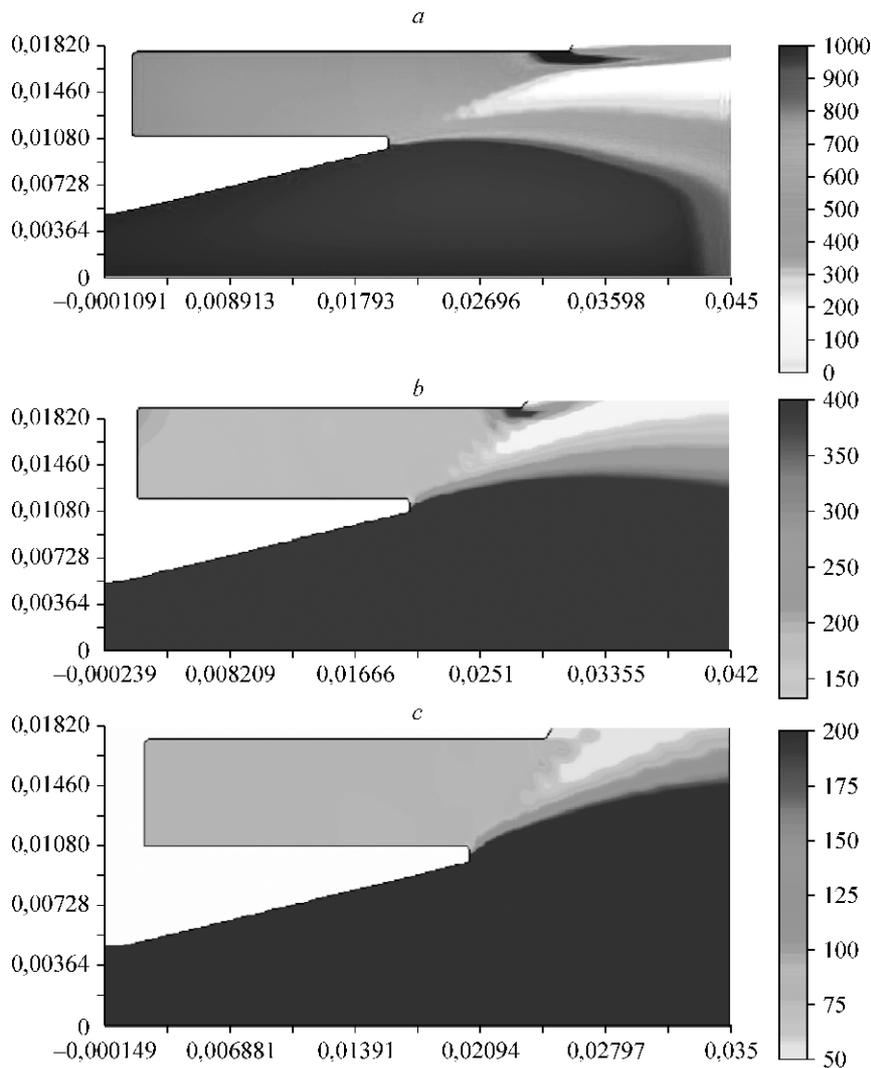


Рис. 5. Структура течения при $\alpha = 30^\circ$ (a), 45° (b), 60° (c).

Наличие зазора в донной части экрана существенно изменяет характер течения внутри экрана. В первую очередь, вместо циркуляционного возникает возвратное течение — в сторону зазора. Это можно видеть на рис. 7, на котором приведены результаты расчета поля векторов скоростей для разомкнутого экрана с $\alpha = 30^\circ$. Точкой *B* на этом рисунке отмечена зона растекания, точкой *A* — зона возникновения возвратного течения на внешней поверхности сопла. Пунктирной линией отмечена граница изменения знака продольной составляющей скорости газа. Как показали расчеты, возникновение возвратного течения изменяет также характер ударно-волнового взаимодействия истекающего из сопла сверхзвукового потока с боковой поверхностью экрана.

Анализ влияния конфигурации донной части (замкнутая, разомкнутая) экрана на величину обратных (загрязняющих) потоков был выполнен на основе экспериментальных данных по осаждению капельной фазы на подложки из бумаги, которые устанавливались внутри экрана на цилиндрической и донной частях. В этих экспериментах рабочая жидкость подкрашивалась не сублимирующимся в вакуу-

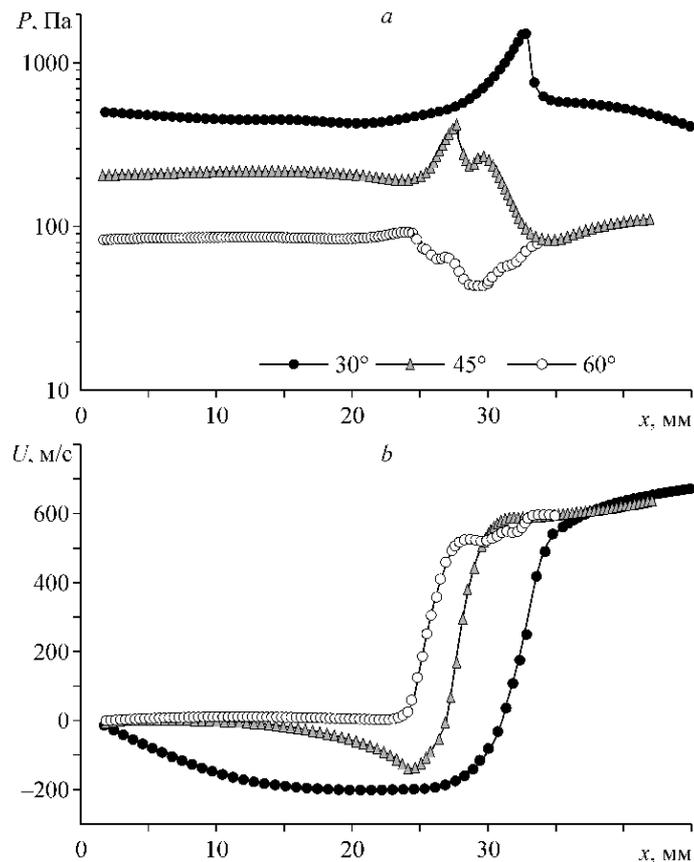


Рис. 6. Распределение давления (а) и скоростей (б) вдоль боковой поверхности экрана.

ме красителем (родамином) с весовой концентрацией 0,07 %. Соответствующие результаты для донных и цилиндрических частей представлены на рис. 8. Можно видеть (см. рис. 8, I), что наличие зазора в донной части экрана создает весьма интенсивный обратный поток газа и, соответственно, увеличивает эффект загрязнения в присопловой части поверхности космического аппарата. Этот вывод подтверждает и окраска внутренней цилиндрической поверхности экранов (см. рис. 8, II) — если для разомкнутого экрана (см. рис. 8, II, б) внутренняя поверхность окрашена на всю длину, то для замкнутого (см. рис. 8, I, а) — окрашена только выходная часть его внутренней поверхности.

Представленные результаты достаточно убедительно демонстрируют, что наличие зазора в донной части экрана существенным образом влияет на величину обратных потоков капельной фазы внутри экрана. Полученный результат

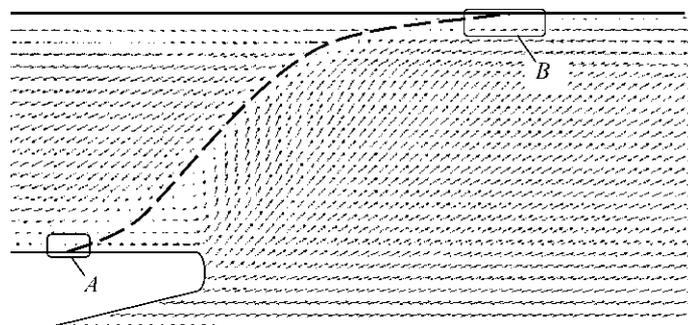


Рис. 7. Поле векторов скорости в межэкранном пространстве для $\alpha = 30^\circ$.

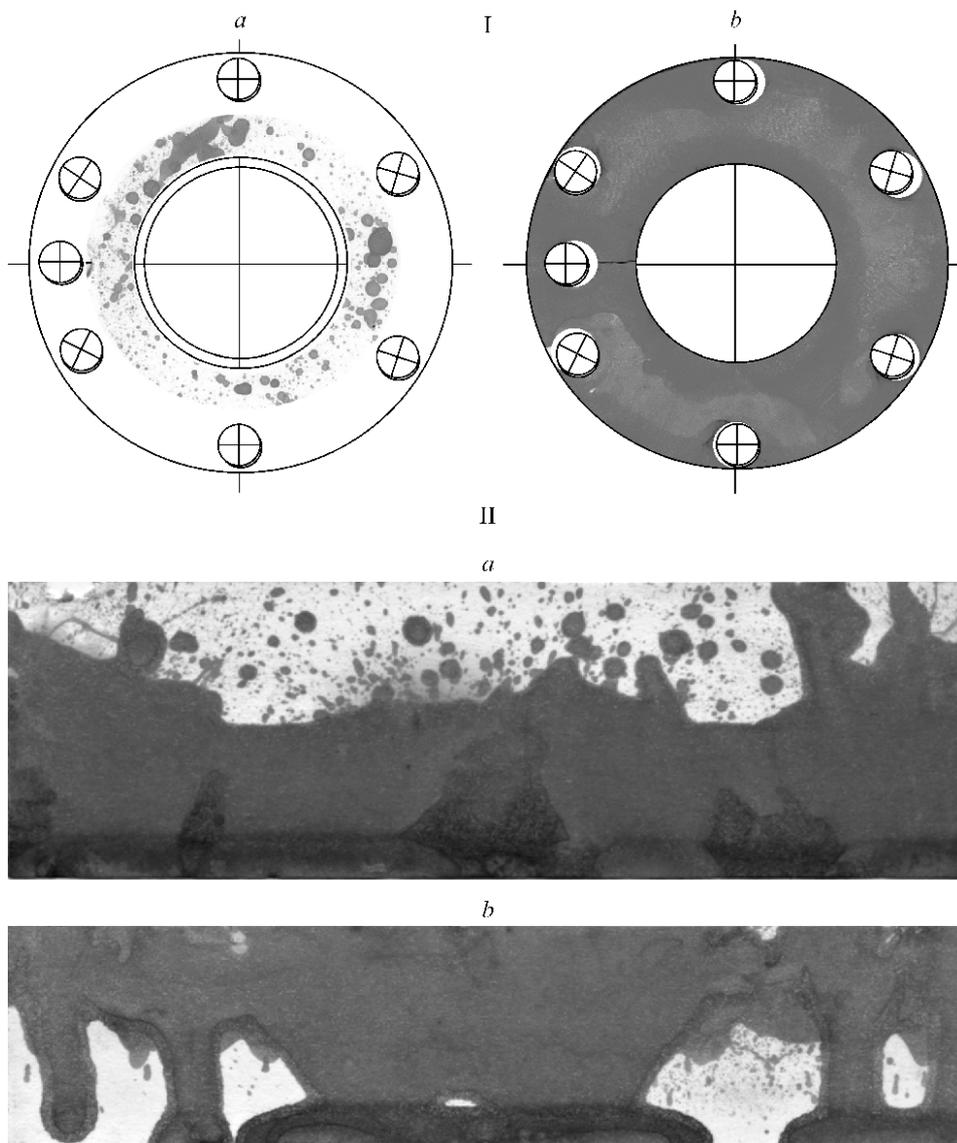


Рис. 8. Окраска донной (I) и внутренней цилиндрической поверхности (II) экранов.
a — замкнутый экран, *b* — разомкнутый экран.

представляется весьма ожидаемым, во всяком случае, на качественном уровне. Для устранения этого негативного эффекта необходимо перекрытие этого зазора, например, с помощью поглощающей капли перегородки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярыгин В.Н., Приходько В.Г., Ярыгин И.В., Герасимов Ю.И., Крылов А.Н. Газодинамические аспекты проблемы загрязнения Международной космической станции. Часть 1. Модельные эксперименты // Теплофизика и аэромеханика. — 2003. — Т. 10, № 2. — С. 279–296.
2. Герасимов Ю.И., Крылов А.Н., Соколова С.П., Приходько В.Г., Ярыгин В.Н., Ярыгин И.В., Ребров С.Г., Буряк А.К. Газодинамические аспекты проблемы загрязнения Международной космической станции. Ч. 2. Натурные эксперименты // Теплофизика и аэромеханика. — 2003. — Т. 10, № 4. — С. 575–586.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2005 г.