

УДК 536.581.3:681.7.055.33:535.12

## Анализ физических моделей влияния иллюминатора криогенной экспериментальной камеры на деформацию волнового фронта

А. И. Беляева, И. В. Камышова

Фізико-технічний інститут низьких температур НАН України, Харків

*Надійшла до редакції 22.04.97*

Досліджено вплив вхідного ілюмінатора криогенної інтерференційної установки на фронт світлової хвилі. Розроблена методика попереднього теоретичного аналізу та моделювання факторів, які призводять до спотворення хвильового фронту ілюмінатором, а також методика лабораторного контролю готового ілюмінатора, що передусе його установці в експериментальній камері. Вибір головних спотворюючих факторів зумовлений двома характерними режимами експлуатації камери: вакуумним та газонаповненим. Порівняння розрахунків з експериментальними оцінками дозволило впевнитися у слушності запропонованих моделей.

### АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА КРИОГЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТЕНДАХ

В последние годы быстрое развитие ИК-астрономии обусловило создание охлаждаемых ИК-телескопов и спектральных приборов, размещенных в лабораториях разных стран и на космических аппаратах. Эти приборы должны быть снабжены криогенной системой охлаждения, обеспечивающей необходимую температуру для работы оптических и электронных элементов (Горянкин и др., 1994; Любарский и др., 1994). При проектировании и изготовлении охлаждаемых оптических приборов, узлов и элементов необходимо учитывать изменение свойств применяемых материалов с понижением температуры, т. е. уметь производить криокомпенсацию при комнатной температуре (Беляева и др., 1989). С этой целью при создании оптических элементов телескопов, изготавливаемых в производственных условиях, необходимо проводить контроль их рабочих поверхностей при криогенных температурах.

Наиболее важной характеристикой, определяющей качество точных поверхностей, является соответствие формы оптических элементов расчетной.

Возрастающие требования к возможностям оптического оборудования приводят к необходимости повышения качества оптических элементов и жестким допускам на отклонение их формы при охлаждении от расчетной — в пределах  $\lambda/15$ — $\lambda/40$  (Амур, 1983). Такие малые отклонения от заданной формы можно обнаружить и измерить с помощью интерференционных методов (Беляева и др., 1988), которые позволяют осуществлять контроль формы оптических деталей с точностью до десятых и даже сотых долей длины волны. Очевидно, что не менее строгие требования должны предъявляться к допускам на неконтролируемые смещения узлов крепления (например, люфты между деталями), перемещения и юстировки оптических деталей интерферометрической установки. При создании подобной установки с криогенным охлаждением испытуемых деталей возникает ряд дополнительных трудностей, обусловленных характерными особенностями криогенной техники, одной из которых является наличие иллюминаторов, деформируемых под влиянием разности давлений внутри и вне вакуумированных объемов или в результате неоднородного охлаждения в газонаполненных криогенных камерах (Шрамко, 1972; Нифонтова и др., 1986), или под воздействием механических нагрузок.

зок, возникающих при герметизации иллюминатора (клеевое или через эластичный уплотнитель) и за счет разности в ТКЛР материалов иллюминатора и его оправки. Изменение геометрической формы иллюминатора, а также возникающая анизотропия в распределении механических напряжений внутри объема материала, в свою очередь, приводит к искажению волнового фронта зондирующего излучения при прохождении через иллюминатор. Правильный выбор конструкции криогенной камеры позволяет решать проблемы, связанные с термическими деформациями конструкционных материалов и особенностями теплофизических процессов охлаждения и стабилизации температур оптических деталей. Однако искажения волнового фронта зондирующего оптического излучения интерферометрической установки, вносимые входным иллюминатором камеры, могут быть лишь ослаблены, и в любом случае их вклад в результирующую интерференционную картину должен быть количественно определен и учтен при анализе интерферограммы. Для минимизации этих искажений нужно правильно выбрать материал и габариты иллюминатора, а также свести к минимуму возможную деформацию, связанную с его установкой в корпусе камеры.

Таким образом, для получения достоверной информации о состоянии поверхностей аттестуемых криогенных оптических деталей необходимо создание прочных, надежных и герметичных иллюминаторов, не оказывающих искажающего влияния на волновой фронт проходящего света в условиях вариации температур и давления. В противном случае искажения, вносимые иллюминатором, необходимо выделить и учесть при анализе интерференционной картины. В этой связи принципиально важно понять их природу и возможности их минимизации. Прогресс в этом направлении возможен только при тесном взаимодействии экспериментальных и теоретических методов исследования напряженно-деформационного состояния иллюминатора, возникающего в самых разнообразных условиях, и его влияния на оптические характеристики системы, а также совершенствование технологии крепления иллюминаторов.

Опыт создания стендов, имитирующих рабочие условия для оптики в космосе, крайне ограничен. Сложность задачи заключается в невозможности предложить универсальный стенд. Как правило, испытание каждого конкретного оптического элемента, аттестация модуля или блока требует разработки оригинального стенда (Morrow et al., 1984; Miller et al., 1982; Petrie, 1984; Crowe et al., 1984). Поэтому в настоящее время актуально развитие

методического подхода к решению задачи, анализ элементов стенда и требований к его отдельным деталям.

В рамках программы создания в Украине стендовой экспериментальной базы и методик для обработки элементов и узлов криогенных оптических систем в Физико-техническом институте низких температур НАН Украины был изготовлен уникальный базовый криогенный экспериментальный стенд для испытаний оптических элементов и узлов в условиях, имитирующих космические (Беляева и др., 1993). Созданная камера неуниверсальна, однако предложенная конструкция позволяет мобильно перестраивать ее в соответствии с требованиями текущего эксперимента. В частности, накоплен опыт испытаний оптических элементов и узлов в этой камере как в вакуумном, так и в газонаполненном варианте.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящей работе рассмотрен конкретный иллюминатор, материал (кварц КВ) и диаметр (160 мм, рабочий диаметр 120 мм) которого заданы спецификой решаемой с помощью данной экспериментальной камеры задачи и размерами оптических деталей, подлежащих контролю. Выбор основных искажающих факторов определялся двумя характерными режимами эксплуатации экспериментальной камеры:

1. Испытания оптических деталей проводятся в вакууме (иллюминатор теплый). Вакуумирование внутреннего объема экспериментальной камеры, приводящее к перепаду давлений на поверхностях иллюминатора, вызывает его изгиб в сторону вакуумированного объема. В этом случае важно правильно выбрать толщину иллюминатора (при заданном материале и диаметре).

2. Испытания оптических деталей проводятся в газонаполненной камере (иллюминатор холодный). В этом варианте важно правильно установить иллюминатор в корпусе камеры, сведя к минимуму несоответствие коэффициентов теплового расширения иллюминатора и оправы.

В связи с этим был рассмотрен ряд упрощенных модельных задач, в рамках которых для конкретного иллюминатора проведены оценки:

- напряжений и деформаций, возникающих под влиянием перепада давлений на его поверхностях при различных видах крепления в корпусе камеры;
- искажений плоского волнового фронта света при прохождении через иллюминатор, деформированный под действием перепада давлений;

— температурных напряжений и деформаций, возникающих в иллюминаторе под действием неоднородных температурных полей при различных видах крепления;

— напряжений и деформаций, возникающих в иллюминаторе при охлаждении из-за несоответствия коэффициентов термического расширения материалов иллюминатора и оправки.

В результате проведенного анализа была определена оптимальная толщина иллюминатора, позволяющая значительно понизить его влияние на волновой фронт при интерференционных исследованиях в вакууме.

Изложена также методика предварительного лабораторного тестирования изготовленного на основе предварительных расчетов иллюминатора, которая по нашему опыту должна предшествовать его установке в экспериментальную камеру. Сравнение расчетов с экспериментальными оценками позволило убедиться в правомерности предложенных моделей.

#### АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ПРИВОДЯЩИХ К ИСКАЖАЮЩЕМУ ДЕЙСТВИЮ ИЛЛЮМИНАТОРА НА ВОЛНОВОЙ ФРОНТ

Деформация иллюминатора под действием перепада давлений внутри и вне камеры при ее вакуумировании (иллюминатор теплый). На рис. 1, а показано диаметрально поперечное сечение иллюминатора. При вакуумировании камеры иллюминатор оказывается под действием равномерно распределенной нагрузки  $P = 101.325$  кПа, перпендикулярной к его поверхности и приводящей к его изгибу. Согласно гипотезе Кирхгофа (Писаренко, 1986) считаем, что в любом сечении иллюминатора, параллельном срединной плоскости ( $z = 0$ ) нормальные напряжения равны нулю и каждый элемент слоя иллюминатора, параллельного срединной плоскости, при изгибе находится в плоском напряженном состоянии. При этом в каждой точке деформированного иллюминатора возникает два главных напряжения: радиальное  $\sigma_r$  и трансверсальной  $\sigma_\theta$ . Распределение этих напряжений зависит от граничных условий на его краях, т. е. от типа крепления иллюминатора в стенке камеры: жесткое защемление иллюминатора по контуру (аналог жесткого клевого соединения) и шарнирное закрепление по контуру (аналог наличия эластичной кольцевой прокладки). Однако, принимая во внимание конечную жесткость клевого соединения, делаем вывод о том, что в реаль-

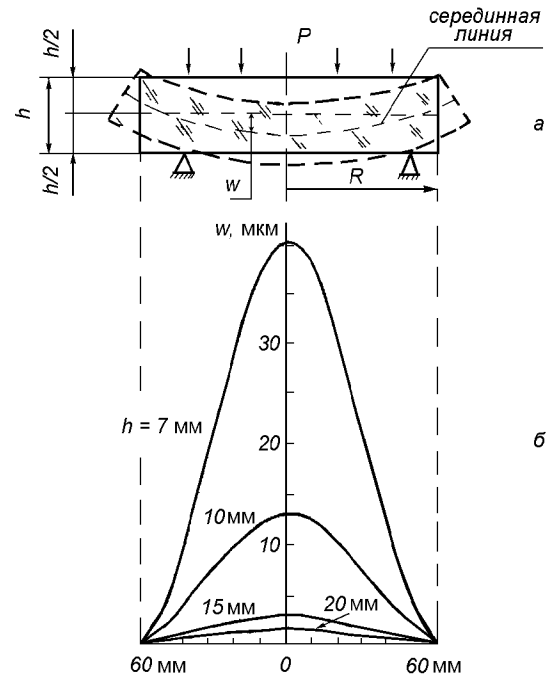


Рис. 1. Схема шарнирного закрепления иллюминатора по контуру: а — поперечное сечение иллюминатора; б — распределение прогиба  $w$  по радиусу  $r$  пластины иллюминатора для разных ее толщин  $h$

ной конструкции крепления, как правило, реализуется шарнирное крепление края иллюминатора. Поэтому подробно рассмотрим случай шарнирного крепления иллюминатора по контуру (Рудицин и др., 1970) (рис. 1, а).

Главные напряжения, возникающие при таком закреплении в иллюминаторе, определяются выражениями:

у контура —

$$\sigma_r = 0, \quad \sigma_\theta = \pm 0.75(1 - \mu)PR^2/h^2; \quad (1)$$

в центре —

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \pm 0.38(3 + \mu)PR^2/h^2, \quad (2)$$

где  $h$  — толщина иллюминатора,  $r$  — текущий радиус,  $P = 101.325$  кПа — величина давления на иллюминатор,  $R = 60$  мм — световой радиус иллюминатора,  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Для величины прогиба пластины иллюминатора при этой конструкции крепления получено следующее выражение:

$$w = Pr^4/(64D) - PR^2r^2(3 + \mu)/[32D(1 + \mu)] + PR^4(5 + \mu)/[64D(1 + \mu)], \quad (3)$$

где  $D = Eh^3/[12(1 - \mu^2)]$  — жесткость,  $E$  — модуль Юнга.

На рис. 1, б показано распределение величины

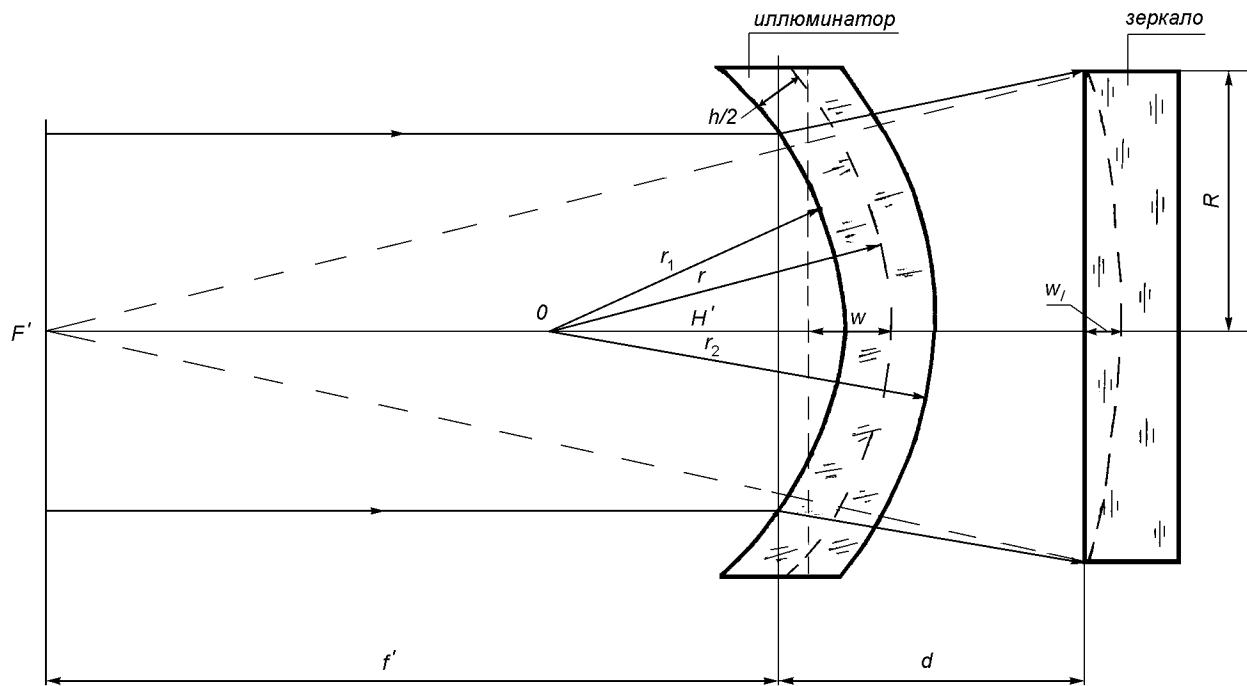


Рис. 2. Деформация волнового фронта световой волны вследствие изгиба иллюминатора под действием разности давлений

прогиба по радиусу пластины для разных ее толщин ( $h = 7$  мм,  $10$  мм,  $15$  мм,  $20$  мм). Максимальное значение достигается в центре пластины ( $r = 0$ ).

**Оценка оптимальной толщины пластины иллюминатора.** Оптимальная толщина иллюминатора для установки в вакуумной камере выбиралась из сравнения оценок деформации волнового фронта иллюминатором толщиной  $h$  с величинами допустимых искажений волнового фронта ( $\lambda/15 \div \lambda/40$ ). Для оценки искажений волнового фронта использовались результаты предыдущего раздела (величины прогиба иллюминатора при различных его толщинах). Определяя степень влияния возникающего прогиба иллюминатора на волновой фронт, мы воспользовались следующими рассуждениями. Для упрощения считаем, что под действием разности давлений плоские поверхности иллюминатора деформируются в сферические (рис. 2). Величины радиусов кривизны этих поверхностей определяются по максимальной величине прогиба  $w_{\max}$  серединной линии, полученной из (3):

$$r_1 = r - h/2, \quad r_2 = r + h/2, \quad r = R^2/2w, \quad (4)$$

где  $r$  — радиус кривизны серединной линии,  $r_1$  и  $r_2$  — радиусы кривизны внутренней и внешней поверхностей иллюминатора соответственно.

Фокусное расстояние  $f'$  центрированной системы сферических оптических поверхностей — в данном случае концентрического мениска — всегда отрицательно (рассеивающая линза) и вычисляется с помощью выражения (Бегунов, 1966)

$$1/f' \sim (n - 1)(r_2 - r_1)/(nr_1r_2), \quad (5)$$

где  $n = 1.46$  — показатель преломления материала иллюминатора (кварц КВ).

Таким образом, для фокусного расстояния получаем выражение

$$f' \sim -nr^2/[h(n - 1)] \sim -nR^4/[4w^2h(n - 1)]. \quad (6)$$

Так как  $f' \gg d$  ( $d$  — расстояние от иллюминатора до зеркала) можно считать, что радиус кривизны волнового фронта в месте расположения зеркала мениска (иллюминатора)  $r_1 \sim f'$ .

Тогда для определения искажения волнового фронта, которое можно характеризовать величиной  $w_1$  (стрелкой прогиба сферического волнового фронта света, падающего на поверхность аттестуемого зеркала (рис. 2)), было получено выражение

$$w_1 \sim R^2/2f' \sim 2hw^2(n - 1)/nR^2. \quad (7)$$

Очевидно, что допустимые значения этой величины должны быть заведомо меньше допустимых искажений, возникающих при взаимодействии све-

товой волны с поверхностями исследуемых элементов (зеркал), т. е.  $w_1 \ll \lambda/15 \div \lambda/40$ .

Исходя из этих допусков, с помощью условия (7) и с учетом рис. 1, б была определена гарантированная толщина иллюминатора для решения настоящей задачи.

Из соотношений (7) очевидно, что  $w_1$  значительно меньше максимальных значений прогиба  $w$  в центре иллюминатора (из-за малости произведений величин  $h/R$  и  $w/R$ ). Для максимальных значений  $w_{\max}$  при различных толщинах иллюминатора и рабочей длины волны  $\lambda = 0.4$  мкм имеем:

- а)  $h = 7$  мм,  $w_{\max} = 40.8$  мкм,  $w_1 = 0.02$  мкм;
- б)  $h = 10$  мм,  $w_{\max} = 13.26$  мкм,  $w_1 = 0.3 \cdot 10^{-3}$  мкм;
- в)  $h = 15$  мм,  $w_{\max} = 3.53$  мкм,  $w_1 = 0.3 \cdot 10^{-4}$  мкм;
- г)  $h = 20$  мм,  $w_{\max} = 1.77$  мкм,  $w_1 = 0.1 \cdot 10^{-4}$  мкм.

Толщины  $h < 10$  мм представляются не пригодными, так как в этом случае величина производной  $\Delta w_{\max}/\Delta h > 1$  и резко увеличивается с уменьшением толщины. Нами была выбрана толщина иллюминатора  $h = 15$  мм. В этом случае для величины прогиба  $w_{\max} = 3.5$  мкм и рабочей длины волны  $\lambda = 0.4$  мкм искажения волнового фронта

$$w_1 \sim \lambda/10^4 \ll \lambda/40$$

(для пластин с  $h > 15$  мм величина производной  $\Delta w_{\max}/\Delta h \ll 1$ ). Таким образом, изменение формы данного кварцевого иллюминатора под действием перепада давлений в вакуумированной экспериментальной камере не должно приводить к существенным искажениям плоского волнового фронта зондирующего излучения.

**Оценка прочности пластины иллюминатора.** Для расчета на прочность оценим напряжения, возникающие у контура и на оси симметрии иллюминатора (толщина  $h = 15$  мм, иллюминатор шарнирно оперт:

- а)  $\sigma_\theta = 0.9$  МПа;
- б)  $\sigma_r = \sigma_\theta = 1.8$  МПа.

Известно (Мозберг, 1991), что предел прочности кварцевого стекла при изгибе составляет 40 МПа, а при сжатии — 600 МПа. Таким образом, рассматриваемый кварцевый иллюминатор имеет многократный запас прочности в отношении напряжений, возникающих при вакуумировании камеры. Однако необходимо отметить, что данная оценка справедлива в случае, когда форма иллюминатора и оправки близки к идеальной, так как в противном случае неизбежна локализация и концентрация напряжений с непредсказуемыми последствиями.

**Оценка температурных напряжений и деформаций, возникающих в иллюминаторе под действием неоднородных полей при различных видах крепления.** При испытаниях оптических элементов в газонаполненной камере, иллюминатор которой обдувается теплым газом с целью предохранения от криоосадков, в последнем могут возникнуть значительные градиенты температур по толщине и в радиальном направлении. Для оценки максимальных значений соответствующих температурных напряжений и деформаций рассмотрим следующую модельную задачу (рис. 3). Пусть температура на наружной поверхности иллюминатора ( $z = h/2$ ) равна комнатной  $T_k$ , а на внутренней ( $z = -h/2$ ) — температуре жидкого азота  $T_{N_2}$  (рис. 3, а), причем изменение температуры по толщине имеет линейный характер (рис. 3, б), а в радиальном направлении градиент температуры отсутствует (это предположение справедливо в случае, когда крепление иллюминатора реализовано таким образом, что отсутствует теплообмен между иллюминатором и боковыми стенками камеры). Очевидно, что при установлении градиента температур каждый плоский слой иллюминатора, параллельный срединной плоскости, стремится деформироваться в соответствии с законами тепловой деформации. Если иллюминатор свободен от за-

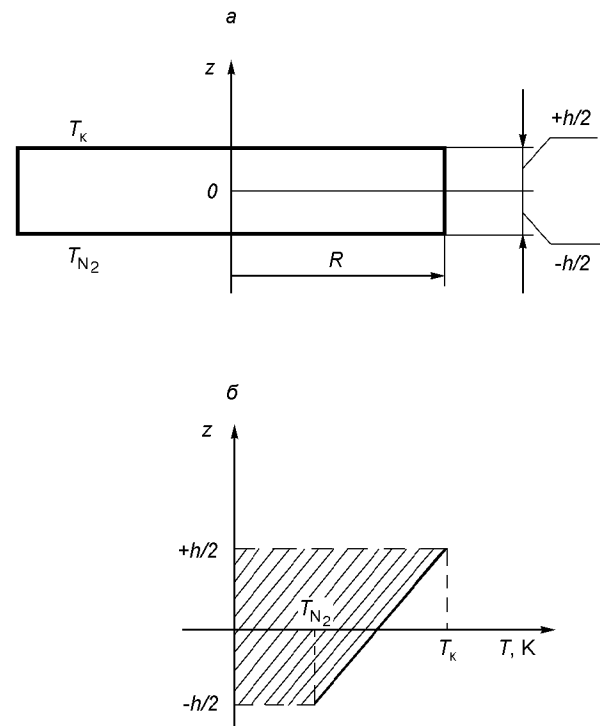


Рис. 3. К оценке температурных напряжений во время работы в газонаполненной камере: а — поперечное сечение иллюминатора; б — изменение температуры иллюминатора по толщине

крепления, то разность диаметров его оснований составит

$$\Delta D = -D\alpha\Delta T, \quad (8)$$

где  $\Delta T = T_k - T_{N_2}$  — перепад температур по толщине;  $D$  — диаметр диска при  $T_k$ ;  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения.

Плоский иллюминатор примет, таким образом, форму концентрического мениска с центром кривизны в точке  $O$  и радиусом кривизны  $r$ . Величину этого радиуса (при  $r \gg h$ ) легко определить:

$$r = h/(\alpha\Delta T). \quad (9)$$

Плоская поверхность иллюминатора приобретает кривизну со стрелкой

$$w = D^2\alpha\Delta T/(8h), \quad (10)$$

что для данного конкретного иллюминатора ( $h = 15$  мм) составит приблизительно 12 мкм. Как следует из выражения (7), это не должно привести к существенному искажению плоского волнового фронта, проходящего через него света и, следовательно, не должно повлиять на интерференцию лучей, отраженных от поверхностей зеркала.

В действительности, однако, иллюминатор закреплен в корпусе камеры и лишен возможности изменять свои размеры в точном соответствии с законами тепловой деформации, что приводит к возникновению температурных напряжений. Для оценки максимальных значений этих напряжений предположим, что иллюминатор сохраняет свою плоскую форму при наличии градиента температур по толщине (этот случай соответствует предельно жесткому креплению иллюминатора). Тогда все слои, перпендикулярные к оси  $z$  (рис. 3, б) будут иметь одинаковые диаметры, равные диаметру слоя с температурой  $\bar{T} = (T_k + T_{N_2})/2$ . При этом слои, имеющие температуру выше  $\bar{T}$ , будут сжаты, а слои с температурой ниже  $\bar{T}$  — растянуты. При симметричном растяжении или сжатии зависимость деформации от напряжения имеет вид:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \varepsilon = 1/E(\sigma_r - \mu\sigma_\theta) = (1 - \mu)\sigma/E, \quad (11)$$

где  $\mu$ ,  $E$  — коэффициент Пуассона и модуль Юнга. Следовательно,

$$\sigma = E\varepsilon/(1 - \mu). \quad (12)$$

Подставив в это выражение деформацию крайнего теплового слоя ( $z = h/2$ )

$$\varepsilon = \varepsilon_k = \alpha(T - T_k) = (\alpha/2)(T_{N_2} - T_k),$$

а также крайнего холодного слоя ( $z = -h/2$ )

$$\varepsilon = \varepsilon_{N_2} = \alpha(T - T_{N_2}) = (\alpha/2)(T_k - T_{N_2}),$$

получим максимальные значения напряжений в иллюминаторе, которые достигаются на его поверхностях:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \pm E\alpha\Delta T/(1 - \mu) = \\ &= \pm E\alpha(T_k - T_{N_2})/[2(1 - \mu)], \end{aligned} \quad (13)$$

где знак «+» относится к растягивающим напряжениям. (Поскольку  $E$  и  $\mu$  слабо зависят от температуры, значения их принимались постоянными и равными значениям при  $T = 300$  К для кварцевого стекла). Для рассматриваемого иллюминатора  $\sigma_{\max} = 4.7$  МПа, что значительно меньше предела прочности при сжатии — 600 МПа.

В первом приближении можно также показать, что при наличии температурных градиентов как по толщине иллюминатора, так и на его поверхности максимальное напряжение в иллюминаторе будет пропорционально максимальной разности температур в иллюминаторе:

$$\sigma_{\max} = \pm E\alpha\Delta T_{\max}/(1 - \mu). \quad (14)$$

Итак, рассмотрев жесткое крепление иллюминатора по контуру, мы определили максимальные значения напряжений. В действительности же при использовании стекол в рациональных конструкциях иллюминаторов отсутствует силовой контакт между стеклоэлементом и металлической оправой. Обычно окна устанавливаются в корпусе камеры с помощью резиновых или фторопластовых прокладок, что позволяет значительно снизить возникающие в них напряжения. Ясно, что при таком способе крепления иллюминатор под действием осевого перепада температур может деформироваться (прогнуться), однако экспериментальная оценка такой деформации показала, что ее значение не превышает деформацию иллюминатора при свободном его закреплении. Это послужило основанием для пренебрежения искажением волнового фронта в данной ситуации.

**Деформация иллюминатора, обусловленная различием коэффициентов теплового расширения его материала и стальной оправы (иллюминатор холодный).** При охлаждении иллюминатор и корпус криокамеры по-разному изменяют свои размеры, что связано с различием коэффициентов линейного расширения  $\alpha$  их материалов. Так, для кварцевого стекла  $\alpha_{кв} = 0.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , а нержавеющей стали —  $\alpha_{ст} = 11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Поэтому существует вероятность, что при охлаждении иллюминатор будет сжиматься корпусом. В этом разделе проанализируем возможность использования имеющегося иллюминатора ( $R_{св} = 60$  мм и  $h = 15$  мм) для работы в газонаполненной камере,

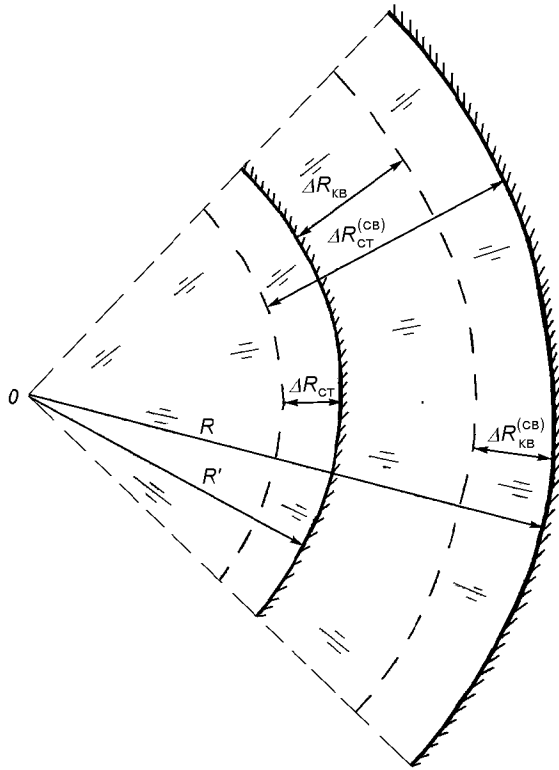


Рис. 4. Деформация иллюминатора, обусловленная различием коэффициентов теплового расширения его материала и стальной оправы

когда иллюминатор и его стальная оправа подвергаются напряжениям в результате охлаждения. Для оценки максимальных значений напряжений  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  рассматривается случай предельно жесткого крепления края иллюминатора в корпусе камеры. Если бы иллюминатор и оправы находились в свободном состоянии, то при понижении температуры на  $\Delta T$ , из-за различия коэффициентов теплового расширения они занимали бы разное положение (на рис. 4 показано пунктиром): радиус свободного кварцевого иллюминатора укоротился бы на величину

$$\Delta R_{кв}^{(сб)} = R\alpha_{кв}\Delta T, \quad (15)$$

где  $R$  — радиус иллюминатора и отверстия в корпусе;  $\alpha_{кв}$  — коэффициент теплового расширения иллюминатора до охлаждения.

Положение свободного стального корпуса изменилось бы на величину

$$\Delta R_{ст}^{(сб)} = R\alpha_{ст}\Delta T, \quad (16)$$

где  $\alpha_{ст}$  — коэффициент теплового расширения стального корпуса.

В действительности же из-за жесткой связи между собой граница между корпусом и иллюминато-

ром займет положение, характеризуемое радиусом-вектором  $R'$ . В результате возникнет относительное радиальное укорочение иллюминатора:

$$\varepsilon_{кв} = \Delta R_{кв} / R' \quad (17)$$

и относительное радиальное удлинение отверстия корпуса:

$$\varepsilon_{ст} = \Delta R_{ст} / R'. \quad (18)$$

В дальнейшем используем зависимость напряжений от деформаций при осесимметричном сжатии (Рудицин и др., 1970):

$$\sigma = E\varepsilon / (1 - \mu) \quad (19)$$

и предположение о том, что напряжения, возникающие на контурах иллюминатора и корпуса, одинаковы:

$$\varepsilon_{ст} E_{ст} / (1 - \mu_{ст}) = \varepsilon_{кв} E_{кв} / (1 - \mu_{кв}). \quad (20)$$

В этом случае из выражения (20) с учетом (17) и (18) получаем соотношение

$$\Delta R_{ст} E_{ст} / (1 - \mu_{ст}) = (\Delta R_{кв} E_{кв}) / (1 - \mu_{кв}). \quad (21)$$

Кроме того, из рис. 4 видно, что существует соотношение

$$\Delta R_{ст} + \Delta R_{кв} = \Delta R_{ст}^{(сб)} - \Delta R_{кв}^{(сб)} = R\Delta T(\alpha_{ст} - \alpha_{кв}), \quad (22)$$

которое вместе с (21) составляет систему уравнений для определения деформаций:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ст} = \{ & E_{кв}(1 - \mu_{ст}) / [E_{ст}(1 - \mu_{кв}) + \\ & + E_{кв}(1 - \mu_{ст})] \} (\alpha_{ст} - \alpha_{кв}) \Delta T, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{кв} = \{ & E_{ст}(1 - \mu_{кв}) / [E_{ст}(1 - \mu_{кв}) + \\ & + E_{кв}(1 - \mu_{ст})] \} (\alpha_{ст} - \alpha_{кв}) \Delta T. \end{aligned}$$

При этом сжимающие напряжения определяются выражением

$$\begin{aligned} \sigma = \{ & E_{ст} E_{кв} / [E_{ст}(1 - \mu_{кв}) + \\ & + E_{кв}(1 - \mu_{ст})] \} (\alpha_{ст} - \alpha_{кв}) \Delta T. \end{aligned} \quad (24)$$

Рассмотрев работу иллюминатора в режиме газонаполненной камеры (иллюминатор холодный) пришли к следующему выводу: под действием осевого перепада температур и из-за несоответствия коэффициентов теплового расширения иллюминатора и его оправы в иллюминаторе возникают напряжения, вызванные его деформацией. В подобных ситуациях несимметричная деформация стеклоэлемента приводит к анизотропии материала — к двойному лучепреломлению. Однако правильное крепление стеклоэлемента с использованием резиновых (фторопластовых) прокладок позволило этого избежать, максимально приблизив деформацию иллюминатора к осесимметричной. В этом случае  $\sigma_r = \sigma_\theta$ , а следовательно, изменения показателей

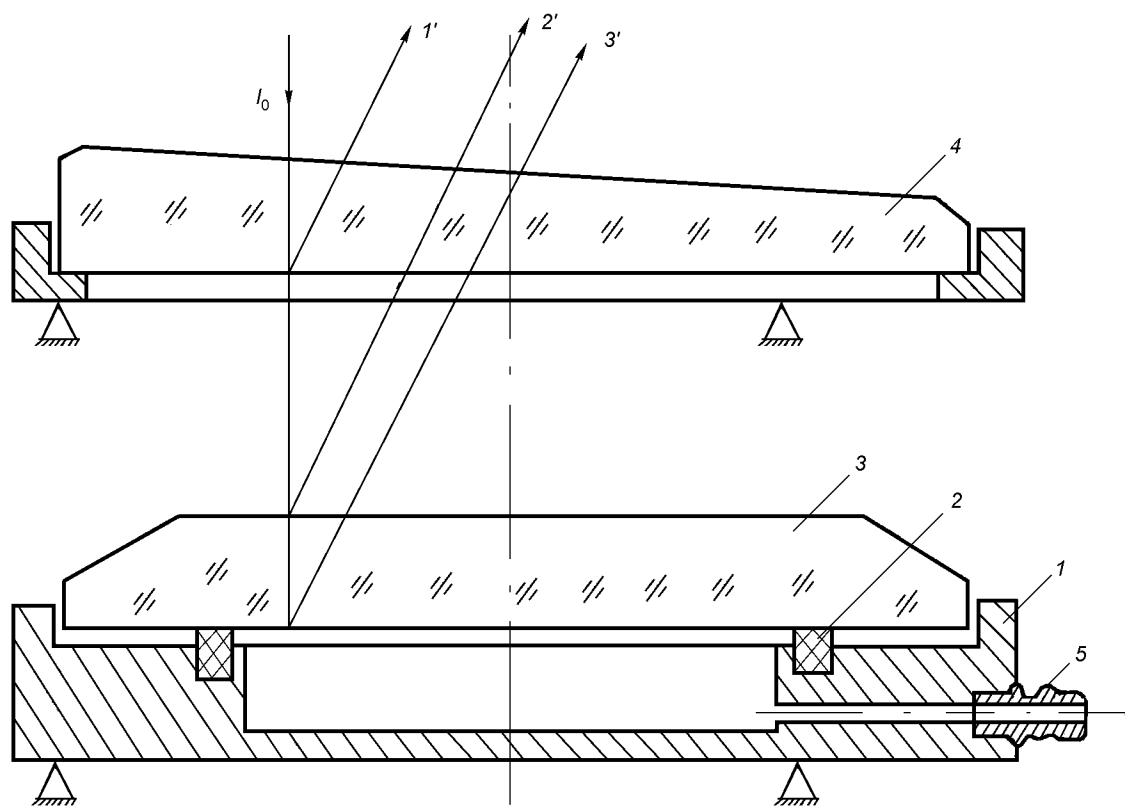


Рис. 5. Лабораторная приставка к интерферометру Физо для моделирования работы иллюминатора в вакуумной экспериментальной камере: 1 — корпус приставки; 2 — уплотнительное кольцо; 3 — иллюминатор; 4 — эталонная пластина интерферометра; 5 — штуцер

преломления в плоскости главных напряжений  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  равны (Шрамко, 1972), т. е. оптическая анизотропия отсутствует. Для этой ситуации (осесимметричное сжатие) и даны выше оценки максимальных значений главных напряжений.

**Оценка прочности пластины иллюминатора.** С помощью выражения (24) оценили величину сжимающих напряжений и сравнили со значением предела прочности  $\sigma_{пр}$  кварцевого стекла при сжатии (Мозберг, 1991): эта величина составила  $\sigma = 135$  МПа, т. е. запас прочности иллюминатора оказался четырехкратным.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ИЛЛЮМИНАТОРА, ИЗГОТОВЛЕННОГО НА ОСНОВЕ РАСЧЕТОВ

Выполнив теоретическое моделирование и оценки двух ситуаций, приводящих к деформации иллюминатора, мы изготовили иллюминатор и перед установкой его в экспериментальной вакуумной камере провели проверку достоверности результа-

тов расчета и правильности рассмотренных моделей для случая деформации иллюминатора под действием разности давлений.

Для осуществления такого эксперимента была изготовлена приставка к интерферометру Физо (рис. 5), представляющая собой плоскую цилиндрическую камеру 1, размещенную на юстируемых опорах предметного столика интерферометра. В канавку укладывалось уплотнительное кольцо 2, на которое устанавливался иллюминатор 3. Интерференционная картина образуется в результате взаимодействия лучей  $1'$ ,  $2'$ ,  $3'$  отраженных от поверхностей иллюминатора и нижней поверхности эталонной пластины интерферометра 4. Для создания деформирующей разницы давлений ( $\Delta P = 101.325$  кПа) объем под иллюминатором откачивался через штуцер 5. Такой способ герметизации иллюминатора близок к шарнирной модели. На рис. 6, а приведена интерферограмма для иллюминатора в ненапряженном состоянии. Видны две системы полос: равноотстоящие примерно линейные полосы равной толщины и одна кольцевая



полоса. Первая система полос обусловлена клиновидностью верхней и нижней поверхностей иллюминатора в направлении, перпендикулярном к линейным полосам и образуется при интерференции лучей  $2'$  и  $3'$ . Кольцевая полоса обусловлена приблизительно осесимметричной неплоскостью верхней поверхности иллюминатора и образуется при интерференции лучей  $1'$ ,  $2'$ . При определении направления отклонения поверхности иллюминатора от плоскости по стандартной методике оказалось, что поверхность имеет выпуклость в сторону эталонной пластины. После деформации иллюминатора в результате откачки внутреннего объема наблюдаемая картина изменяется (рис. 6, б).

Мы определяли величины деформаций иллюминатора, основываясь на факте, что расстояние между соседними кольцами соответствует изменению воздушного зазора между поверхностями эталонной пластины и иллюминатора на половину длины волны источника света (лазер,  $\lambda = 0.63$  мкм). Если в поле зрения находится  $N$  концентрических колец, то величина прогиба испытываемой поверхности:

$$w = N\lambda/2.$$

Вычитая из числа наблюдаемых в поле зрения колец  $N$ , кольца, обусловленные отклонением поверхности иллюминатора от плоскости, определили деформацию иллюминатора под влиянием давления:  $w = (12 - 1)0.63/2 = 3.41$  мкм. Сравнение расчетных оценок ( $w = 3.5$  мкм) и экспериментальных результатов показало хорошее согласие, что свидетельствует о правильном моделировании конкретной ситуации и пригодности изготовленного иллюминатора для работы в экспериментальной камере.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан методический подход, включающий предварительный анализ, моделирование факторов, приводящих к искажению волнового фронта иллюминатором криогенной экспериментальной камеры при интерферометрических исследованиях и предварительный лабораторный контроль готового иллюминатора. В результате сравнения оценочных расчетов и экспериментальных результатов влияния деформации входного иллюминатора под действием перепада давления на величину искажений, вносимых иллюминатором в интерференционное поле установки, получено достаточно хорошее соответствие расчета и эксперимента.

Получены оценки деформаций волнового фронта кварцевым иллюминатором диаметром 160 мм для

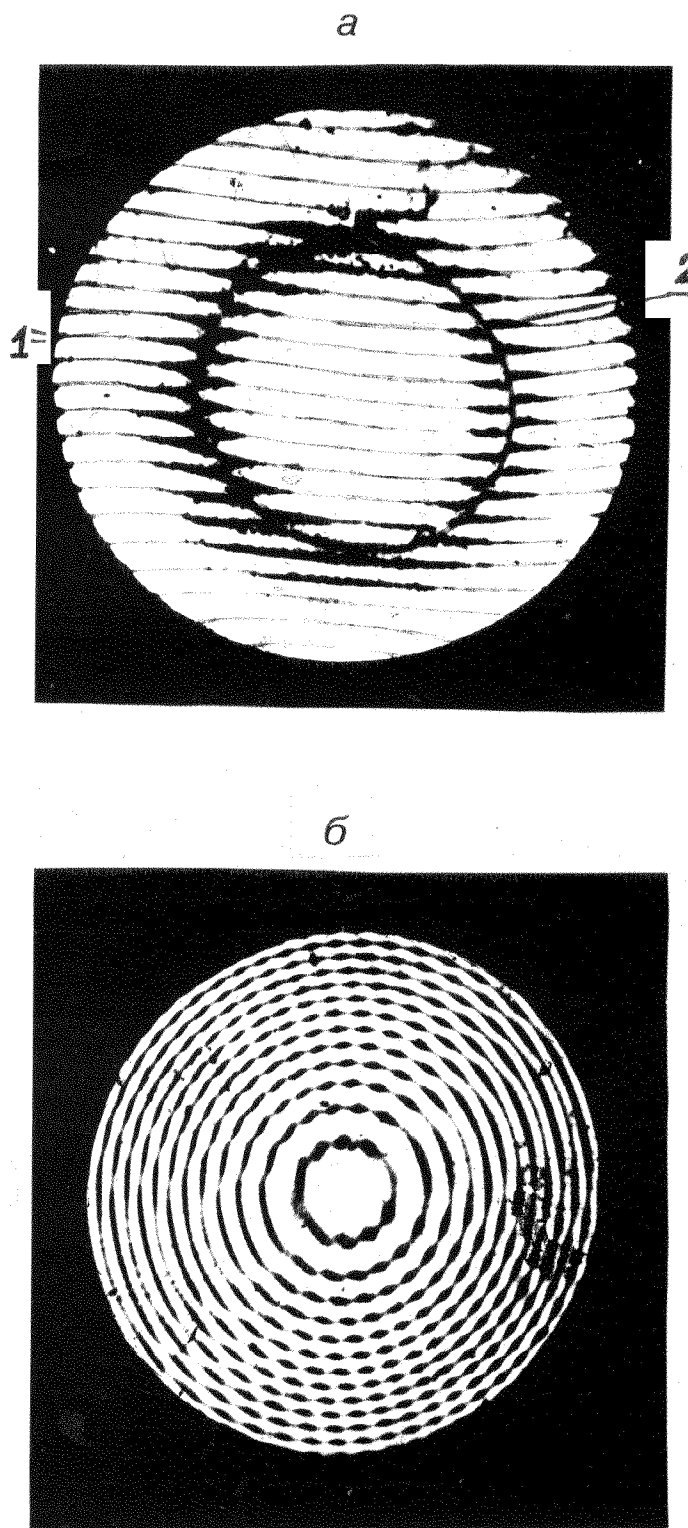


Рис. 6. Интерферограммы иллюминатора: а — в ненапряженном состоянии; б — после деформации при откачке внутреннего объема

разных его толщин вследствие вакуумирования внутреннего объема экспериментальной камеры. Сравнение полученных оценок с допустимыми искажениями волнового фронта позволило выбрать оптимальную толщину иллюминатора вакуумированной экспериментальной камеры  $h = 15 \pm 5$  мм, обеспечивающую его незначительное влияние на волновой фронт.

Получены оценки напряжений в иллюминаторе, обусловленные возможным несоответствием коэффициентов теплового расширения иллюминатора и оправы при испытаниях в газонаполненной камере (иллюминатор холодный).

Величина напряжения, возникающего при рассмотренной установке иллюминатора в корпусе камеры сравнивалась со значением предела прочности кварцевого стекла при сжатии. В результате сравнения было определено, что данный иллюминатор имеет более чем четырехкратный запас прочности, что дает право считать его пригодным при испытаниях в заданных условиях.

Предложенный в работе методический подход может быть использован в случае, когда имеется готовый иллюминатор и необходимо оценить его пригодность к работе в конкретных условиях. Такая задача часто встречается в случае, когда в качестве иллюминатора используется эталонная пластина интерферометра.

- Амур Г. И. Параметры материала, определяющие точность поверхности крупных астрономических зеркал // Опτικο-мех. пром-сть.—1983.—№ 3.—С. 4—6.
- Бегунов Б. Н. Геометрическая оптика. — М.: Издательство МГУ, 1966.—210 с.
- Беляева А. И., Силаев В. И., Стеценко Ю. Е. Проточные криостаты для лабораторных исследований. — Киев: Наук. думка, 1987.—232 с.
- Беляева А. И., Клушин Н. П., Коноводченко Е. В., Цыбульский В. В. Методы контроля качества оптических поверхностей. — Харьков, 1988.—36 с.—(Препринт / АН УССР. ФТИНТ; № 21—88).
- Беляева А. И., Коноводченко Е. В. Низкофононовые спектральные приборы. — Харьков, 1989.—48 с.—(Препринт / АН УССР. ФТИНТ; № 35—89).
- Беляева А. И., Сиренко В. А. Криогенные многослойные покрытия. — Киев: Наук. думка, 1991.—273 с.
- Беляева А. И., Камышова И. В., Силаев В. И., Стеценко Ю. Е.

- Экспериментальный стенд для оптических зеркал, охлаждаемых жидким гелием // ПТЭ.—1993.—№ 6.—С. 186—189.
- Горянкин Г. С., Денисов Р. Н., Ермаков Б. А. и др. Криооптические системы // Оптический журн.—1994.—№ 1.—С. 71—74.
- Любарский С. В., Химич Ю. П. Оптические зеркала из нетрадиционных материалов // Оптический журн.—1994.—№ 1.—С. 76—83.
- Мозберг Р. К. Материаловедение. — М.: Высш. шк., 1991.—448 с.
- Нифонтова Е. Г., Шрамко Ю. П. Деформация фронта волны в круглой пластине с радиальным градиентом температуры // Опτικο-мех. пром-сть.—1986.—№ 8.—С. 16—18.
- Писаренко Г. С., Амелянович К. К., Козуб Ю. И. и др. Конструкционная прочность стекол и ситаллов. — Киев: Наук. думка, 1979.—284 с.
- Писаренко Г. С. Сопrotивление материалов. — Киев: Вища шк., 1986.—776 с.
- Рудин М. Н., Артемов П. Я., Любошиц М. И. Справочное пособие по сопротивлению материалов. — Минск: Вышейшая шк., 1970.—630 с.
- Шрамко Ю. П. Влияние теплового режима иллюминатора на деформацию фронта волны // Опτικο-мех. пром-сть.—1972.—№ 3.—С. 14—17.
- Crowe D. A., Melugin R. R., Miller J. H. Ultra lightweight mirror performance at 8 degrees Kelvin // Proc. SPIE.—1984.—509.—P. 179—190.
- Miller J. H., Witteborn F. C., Garland H. J. Cryogenic testing of mirrors for infrared space telescopes // Proc. SPIE.—1982.—332.—P. 413—418.
- Morrow H. E., Hamamoto A. S., Ferguson G. K., Jeffrey P. L. Interferometry at cryogenics temperatures // Proc. SPIE.—1984.—509.—P. 152—170.
- Petrie W. IRAS telescope cryotest chamber // Proc. SPIE.—1984.—509.—P. 110—118.

#### ANALYSIS OF PHYSICAL MODELS FOR THE EFFECT OF THE CRYOGENIC CAMERA WINDOW ON WAVE FRONT DEFORMATION

A. I. Beliaeva and I. V. Kamyshova

Influence of the window of cryogenic interference set up (CIS) on the light wave front was studied. Main factors which govern wave front distortion by the window were simulated. A method was developed for preliminary theoretical model analysis of these factors. Original method of laboratory control of the window before its installation into the CIS is suggested. The choice of the main distorting factors was determined by two characteristic regimes of CIS operation (vacuum and gas-filled). Comparison of theoretical calculations with experimental data suggests that the models proposed are adequate.