

Жидкокристаллическая визуализация при изучении течения в мелкой каверне

Г.М. Жаркова¹, В.Н. Коврижина², Д.С. Миронов³, А.Ю. Пак⁴, А.П. Петров⁵

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН

¹ ORCID: 0000-0002-0173-2962, zharkova@itam.nsc.ru

² ORCID: 0000-0002-0948-4481, kovrizhina@itam.nsc.ru

³ ORCID: 0000-0001-7316-4282, mironov_ds@itam.nsc.ru

⁴ ORCID: 0009-0004-1947-1651, pak@itam.nsc.ru

⁵ ORCID: 0000-0002-2683-8114, petrov@itam.nsc.ru

Аннотация

В работе на примере обтекания мелкой каверны продемонстрированы возможности жидкокристаллической визуализации при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях потока. Использовались 2 типа ЖК покрытий. Для определения структуры течения на дне каверны использовалось покрытие на основе композиции из чистых холестерических ЖК. Для определения распределения температур и тепловых потоков использованы термочувствительные пленки, сформированные путем капсулирования ЖК в полимерную матрицу.

По результатам экспериментов получено влияние числа Маха на пространственную картину течения внутри каверны и распределение температуры на дне каверны. Полученная при помощи ЖК покрытия картина поверхностных линий тока совпадает с полученной при помощи сажемазляной визуализации. При этом ЖК метод позволяет сравнить величины касательных напряжений на различных участках поверхности. Обнаружено, что возникновение резонансных явлений приводит к перестройке течения внутри каверны и изменению величин касательных напряжений. Показано, что при дозвуковом обтекании зона повышенного теплообмена сосредоточена вблизи оси симметрии каверны.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, мелкая каверна, температура, касательное напряжение, сажемазляная визуализация, пульсации Росситера.

1. Введение

Исследование течения в кавернах является одной из классических задач аэродинамики и имеет большое практическое значение при разработке методов управления течением, оптимизации теплоотдачи, аэродинамического сопротивления, интенсификации или ослабления генерируемых пульсаций давления. Несмотря на простоту геометрии мелкой каверны, при её обтекании возникает сложное пространственное течение. Структура и режим течения в каверне зависят от соотношения ее геометрических размеров [1,2], формы/наклона стенок [3], скорости и направления потока [4–6], толщины и состояния пограничного слоя у передней кромки [7].

Традиционно для исследования такого рода течений применяются микрофоны или датчики давления [2], термоанемометры [8]. При изучении тепловых процессов, происходящих на поверхности модели, применяются термопары. [3]. Из панорамных методов исследования течений могут применяться инфракрасная термография (ИКТ), методы масляной пленки (сажемазляной, метод густого масла), метод сублимирующих покрытий и др.. При изучении сложных течений эффективно сочетание различных панорамных методов визуализации, сравнение которых позволяет повысить

достоверность экспериментальных данных, особенно, учитывая сравнительно малое количество работ, посвященных диагностике теплоотдачи и поверхностного трения в кавернах.

Для более детального исследования тепловых процессов внутри каверны определенный интерес представляют жидкокристаллические (ЖК) покрытия [9-14]. Это обусловлено возможностью получения панорамных качественных и количественных данных о температуре, тепловом потоке и их эволюции по времени. Кроме этого, ЖК покрытия, чувствительные к касательному напряжению, позволяют визуализировать картину предельных линий тока и распределение касательных напряжений.

Цель настоящей работы - на примере мелкой каверны провести тестирование методов ЖК для визуализации панорамного распределения температуры и поверхностного трения.

2. Основы жидкокристаллической визуализации

Главными особенностями жидких кристаллов (ЖК) являются высокая лабильность их структур и анизотропия физических свойств. Как следствие небольшие внешние воздействия (температура, механические напряжения, электрические и магнитные поля) вызывают их деформацию, что приводит к изменению ориентации молекул в слое, их надмолекулярной структуры и оптических свойств.

В основе методов ЖК визуализации лежит дифракция света на спиральной структуре одного из типов ЖК – холестерических ЖК (ХЖК) [15]. При нанесении на поверхность этот тип ЖК может образовывать 2 текстуры: конфокальную и планарную. Конфокальная текстура характеризуется беспорядочным расположением оптических осей спирали, а в планарной текстуре все оси спиралей ориентированы в одном направлении и перпендикулярно поверхности, на которую нанесено покрытие (Рис.1).

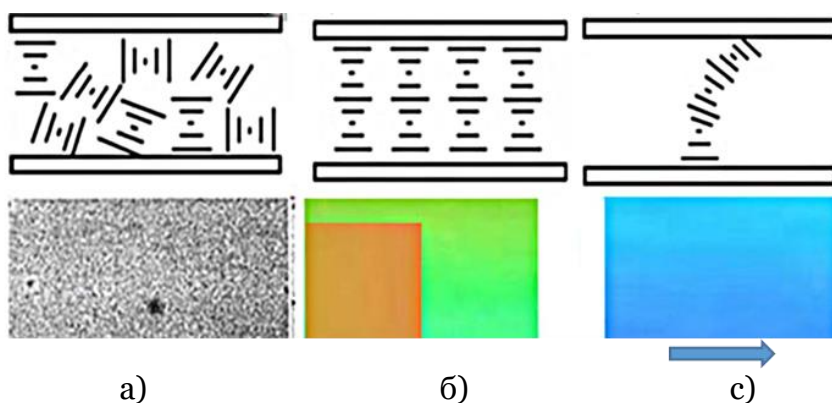


Рис. 1. Структура ХЖК (верхний ряд) и оптический отклик ЖК: (а) конфокальная текстура; (б) планарная; (с) планарная деформированная тангенциальным сдвигом.

Свет, падающий на планарную текстуру, отражается селективно в соответствии с условием Вульфа-Брегга: длина волны максимума селективного отражения $\lambda_0 = 2nd \cos \theta$, где n - средний показатель преломления света, $d = P/2$ - шаг спирали (период дифракционной решетки), а θ - угол между падающим лучом и холестерической плоскостью. Для реального случая с несовершенной планарной текстурой λ_0 зависит также от углов падения φ_n и отражения φ_0 света:

$$\lambda = Pn \cos \frac{1}{2} \left[\arcsin \left(\frac{\sin \varphi_n}{n} \right) + \arcsin \left(\frac{\sin \varphi_0}{n} \right) \right]$$

В аэродинамических экспериментах на спираль ХЖК одновременно воздействуют температура, механический сдвиг и давление. В то же время, в условиях нашего эксперимента влиянием давления можно пренебречь, поскольку ЖК изменяют свои свойства лишь при воздействии на них давления выше 10 атм.

В ИТПМ на основе эфиров холестерина и ряда кислот разработаны и применяются покрытия на основе ХЖК, длина волны селективного отражения которых изменяется под влиянием температуры исследуемой поверхности (т.е. шага спирали) (рис.2), так и под влиянием деформации, индуцируемой механическим сдвигом (т.е. угла наклона оптической оси спирали) (рис.3). На рис.2 и 3 приведены цвето-температурные зависимости (ЦТХ) различных смесей эфиров холестерина.

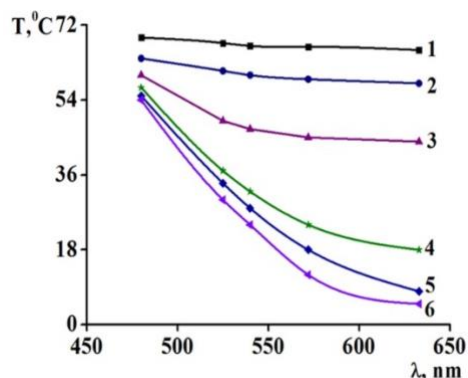


Рис.2. Пример ЦТХ ЖК составов с разной чувствительностью к температуре.

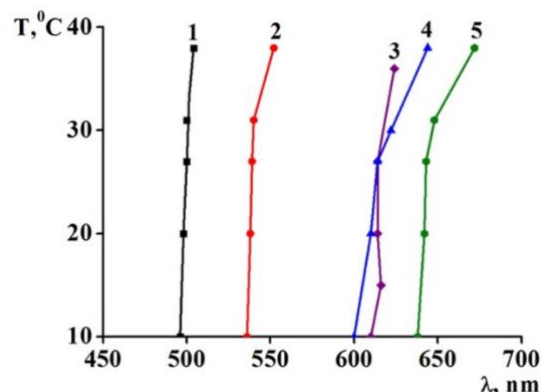


Рис.3. Пример ЦТХ ЖК составов малочувствительных к температуре.

Чтобы защитить термочувствительные составы от влияния механического сдвига, они капсулируются в полимерную матрицу. В результате получаются термоиндикаторные пленки, чувствительные только к температуре (рис. 4 и 5).

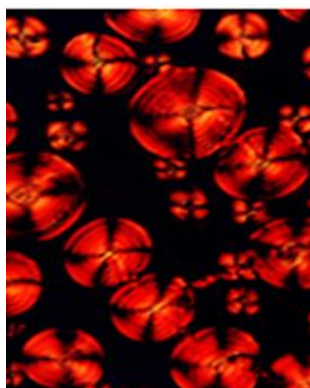


Рис.4 Микроскопическая структура полимерно-жидкокристаллической пленки.

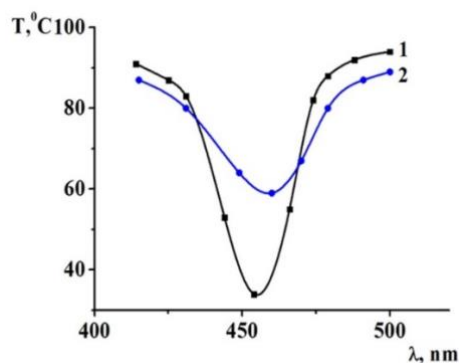


Рис.5 Спектр отражения чистого ЖК (1) и ЖК в полимере (2).

Основные характеристики разработанных термоиндикаторных пленок: толщина – 20÷50 мкм; температурный интервал от -5 до 150 °С; температурная чувствительность 10⁻⁴ Вт/см²; время отклика 3÷30 мс; срок годности более года.

В качестве характеристик цвета оптического отклика ХЖК на то или иное воздействие и для цифровой обработки полученных в эксперименте цветных изображений используются хроматические координаты в той или другой системе

цветовых координат. Как правило, используется преобразование из цветовой системы координат RGB в систему HSI (цветовой тон, насыщенность, интенсивность).

В представленных экспериментах использовалась хроматическая координата – цветовой тон H (Hue). С уменьшением локальной температуры ЖК покрытия монотонно изменяют свой цвет от синего до красного. На Рис. 6 показана типичная зависимость цветового тона от температуры $H(T)$. Зависимость цветового тона от касательного напряжения в условиях эксперимента с покрытием на основе смеси чистых ХЖК также описывается полиномом невысокой степени. Поэтому для качественного анализа структуры течения на исследуемой модели удобно использовать карты цветового тона [16].

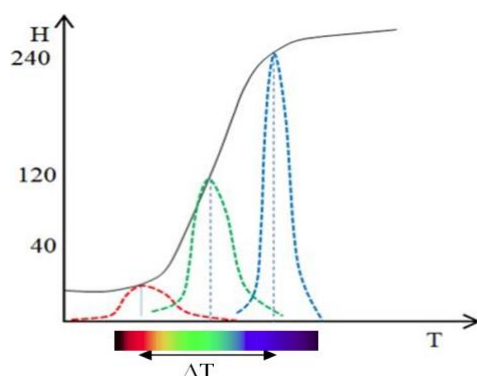


Рис. 6. Типичная зависимость цветового тона от температуры $H(T)$.

Качественная интерпретация полученных ЖК термограмм строится на корреляции особенностей обтекания с теплоотдачей, как то: области присоединения потока соответствует повышенная теплоотдача от поверхности (относительно холодные участки -красный цвет), застойным областям соответствует пониженная теплоотдача (относительно горячие синие участки поверхности) и др. Аналогично, под влиянием трения на участках с более высоким уровнем касательных напряжений τ происходит смещение длины волны отраженного света в синюю область спектра. В областях отрыва цвет покрытия остается первоначальным. Цветовой тон оптического отклика ЖК используется для калибровки и разработки составов ЖК с требуемыми метрологическими характеристиками.

3. Условия эксперимента

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе Т-325М ИТПМ СО РАН с поперечным сечением рабочей части 40×40 мм², которая является установкой баллонного типа периодического действия. Для моделирования различных скоростей набегающего потока имеется набор сменных рабочих частей. Дозвуковая рабочая часть имеет постоянное сечение и подпорную шайбу на выходе, позволяющую плавно изменять число Маха набегающего потока от 0,3 до 0,7. Сверхзвуковые рабочие части имеют встроенное сопло на определенное число Маха (2, 3 или 4). Изменение числа Рейнольдса может производиться за счет изменения полного давления в форкамере аэродинамической трубы. Единичное число Рейнольдса составило $Re_1 = 19 \cdot 10^6$ м⁻¹ во всех проведенных экспериментах, кроме экспериментов с максимальной скоростью $M = 4$, где $Re_1 = 21 \cdot 10^6$ м⁻¹.

Модель пластины с прямоугольной каверной, изготовленная из оргстекла, была установлена в одну из сменных боковых стенок рабочей части. В экспериментах использовалась каверна длиной $L = 60$ мм, шириной $W = 30$ мм и глубиной $D = 9$ мм. Каверна с таким соотношением размеров относится к тем называемым мелким кавернам [2], когда отношение длины к глубине L/D больше единицы, а реализующееся в ней течение при $L/D = 6,7$ относится к открытому типу.

Визуальный доступ в рабочую часть аэродинамической трубы обеспечивался за счет установки на боковой стенке, противоположной каверне, окна с оптическим стеклом. Снаружи аэродинамической трубы располагалась система подсветки и камера. Схема эксперимента и используемая система координат представлены на рис. 7.

Для контроля уровня пульсаций давления и определения режима течения в верхней стенке рабочей части в сечении $x/L = 1,17$ (см. рис. 1 б) был установлен датчик давления Кулайт (Kulite) XCS-093-25А. Для определения структуры потока в каверне, была использована сажемазляная визуализация, позволяющая получить линии тока на поверхности модели. Для этого использовалась смесь веретенного масла с сажой. Для лучшей видимости линий тока модель каверны была окрашена в белый цвет. Время выдержки сажемазляной смеси в потоке определялось эмпирически при помощи записи видео для каждого из режимов течения.

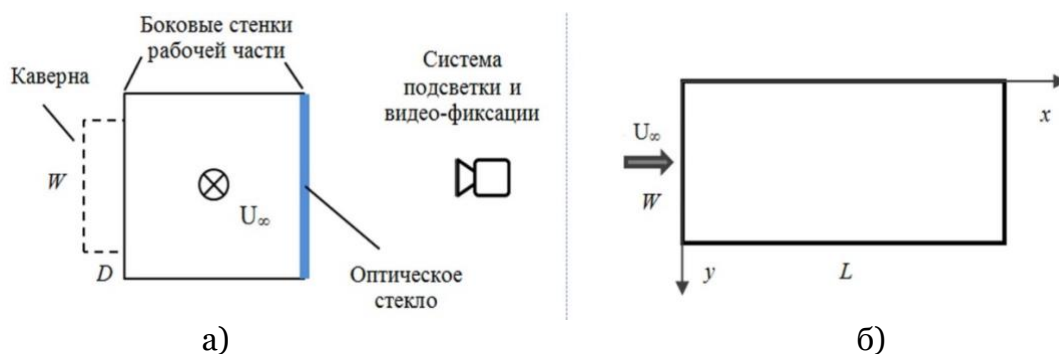


Рис. 7. Схема эксперимента (вид спереди) (а) и используемая в каверне система координат (б)

Для верификации полученных при помощи сажемазляной визуализации данных о структуре течения в каверне и изучения влияния на нее числа Маха методами жидкокристаллических покрытий была выполнена диагностика полей температур. Длительность эксперимента также контролировалась в процессе видео - фиксации (25 кадров в секунду) и составляла не более 100, иногда 200 с, что позволяло пренебрегать перетоками тепла по исследуемой модели. Методики применения, калибровки и цифровой обработки экспериментальных данных, полученных с помощью ЖК, описаны, например, в [9–15].

В работе использовались 2 типа ЖК покрытий: чувствительная к температуре полимерно - жидкокристаллическая пленка и покрытие на основе композиции из чистых холестерических ЖК (ХЖК), чувствительных к касательному напряжению поверхностного трения.

Термочувствительная пленка с шириной области селективного отражения $\Delta T = (15 \div 17)^\circ\text{C}$ наклеивалась на модель. До начала эксперимента модель каверны, покрытая термочувствительной пленкой, находилась при комнатной температуре и имела темно - синий цвет. После включения потока вследствие охлаждения цвет ЖК покрытия изменялся в соответствии с локальной интенсивностью теплообмена поверхности с потоком. С уменьшением локальной температуры покрытия монотонно изменяют свой цвет от синего до красного. При этом цветовой тон N уменьшается практически линейно.

Чистые ЖК, чувствительные к касательному напряжению τ и нечувствительные к температуре в исследуемом диапазоне температур, наносились на модель с помощью напыления с последующим созданием селективно отражающей свет планарной текстуры ХЖК перед каждым экспериментом при необходимости. Время отклика ЖК составляет в зависимости от вязкости состава 20 - 100 мс.

4. Результаты и обсуждение

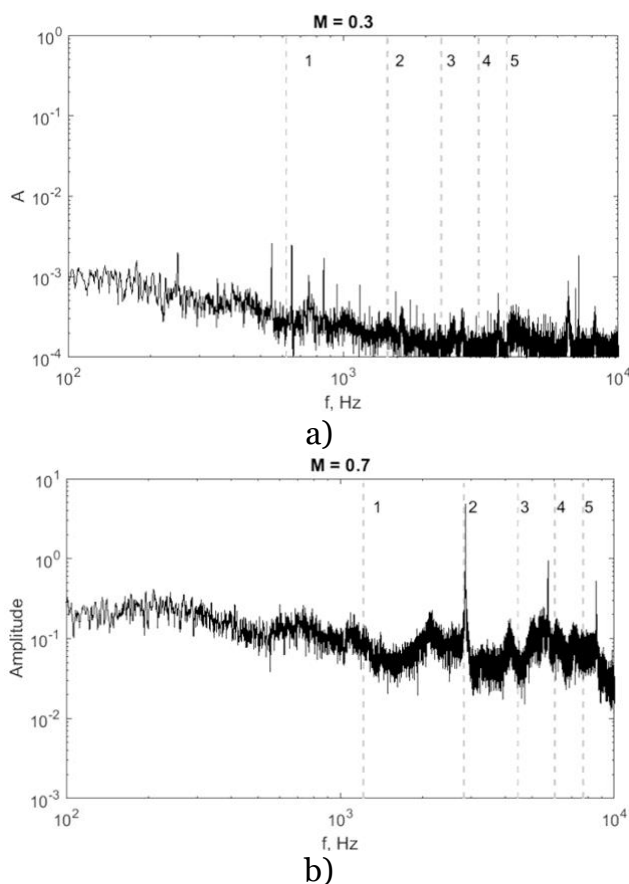
Ранее было обнаружено, что в исследуемой мелкой каверне [6, 8], при числах Маха от 0,3 до 0,75 могут реализоваться два вида структуры течения, которые коррелируют с отсутствием или наличием генерации высокоинтенсивных акустических пульсаций, называемых пульсациями Росситера [17,18]. Для определения частот отдельных мод пульсаций используется полуэмпирическая формула Росситера [18]:

$$f = \frac{U_\infty}{L} \frac{m - \alpha}{M + 1/k}$$

где U_∞ – скорость свободного потока, m – номер моды, $k = U_c/U_\infty$ – безразмерная скорость сноса вихрей, α – отставание фазы (в длинах волн, $\alpha < 1$) в результате временной задержки между моментом столкновения вихря с задней кромкой каверны и моментом испускания звуковой волны. Величины эмпирических констант $k = 0,57$ и $\alpha = 0,25$ наиболее точно соответствуют большинству экспериментальных данных [19, 20].

На рис. 8 представлены примеры спектров сигнала датчика давления, установленного сбоку от исследуемой каверны. Пунктирными линиями на них обозначены частоты, рассчитанные по формуле (1), с указанием номера соответствующей моды. На спектре, соответствующем числу Маха 0,3 наблюдается несколько дискретных пиков, близких по частотам к первой моде Росситера. На спектре, соответствующем $M = 0,7$ наблюдается дискретный пик значительной амплитуды на частоте, совпадающей со второй модой Росситера, что говорит о возникновении резонансных явлений при таком режиме течения.

При сверхзвуковых скоростях потока пульсации давления, близкие по частотам к пульсациям Росситера, наблюдаются только при $M = 2$. Заметное отличие от расчетного значения второй моды может быть обусловлено тем, что для расчета использованы такие же значения эмпирических констант k и α в формуле (1), что и для дозвуковых скоростей набегающего потока.



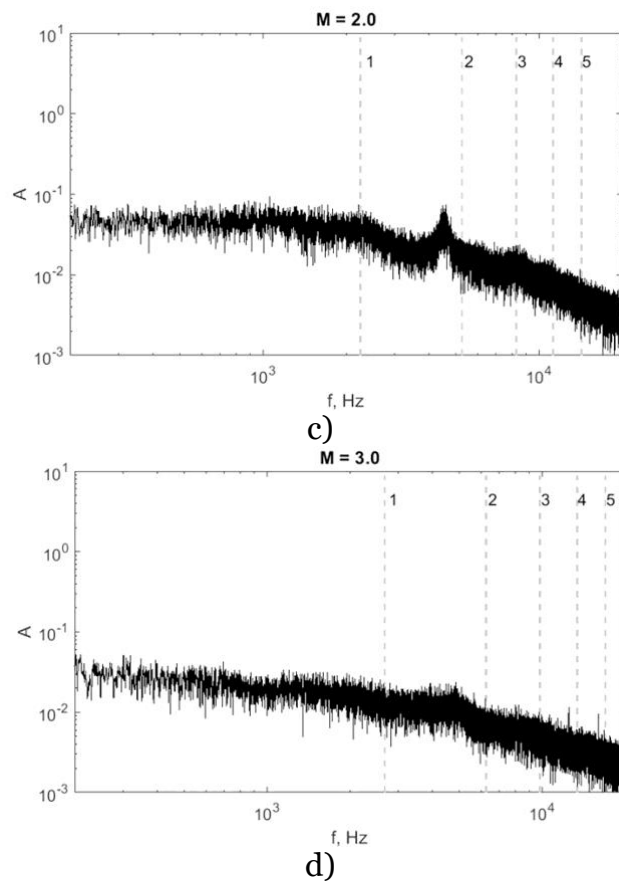


Рис.8. Фурье спектры сигнала датчика давления.

Первый тип течения, когда высокоинтенсивные пульсации давления в течении отсутствуют, наблюдается при числах Маха до 0,4. Картина такого течения на дне каверны, полученная при помощи сажемазляной визуализации при числе Маха набегающего потока 0,3, показана на рис. 9а. Здесь и далее набегающий поток направлен слева направо. На представленном фото в передней части каверны наблюдается застойная зона, занимающая порядка 25% от длины каверны. Течение имеет ячеистую, немного несимметричную структуру, что может быть связано с нестрогой перпендикулярностью передней кромки к вектору скорости набегающего потока или погрешностями в изготовлении модели. Возвратное течение в средней части каверны говорит о наличии внутри каверны двух основных вихрей, закрученных по потоку. Отсутствие присоединения сдвигового слоя ко дну также свидетельствует о реализации открытого типа течения. Линия присоединения находится в положении $x/L = 0,85$.

При возникновении высокоинтенсивных пульсаций происходит заметная перестройка течения. Картина течения при $M = 0,7$ показана на рис. 9б. В таких случаях на дне возникают точки присоединения (источники), из которых происходит всестороннее растекание. Линии тока от этих источников, расходясь сначала во всех направлениях, сносятся возвратным течением к передней стенке каверны. Такая структура линий тока свидетельствует о формировании тороидальных вихрей, вытянутых в сторону передней кромки. Кроме того, задняя линия присоединения смещается ближе к задней стенке до положения $x/L = 0,9$.

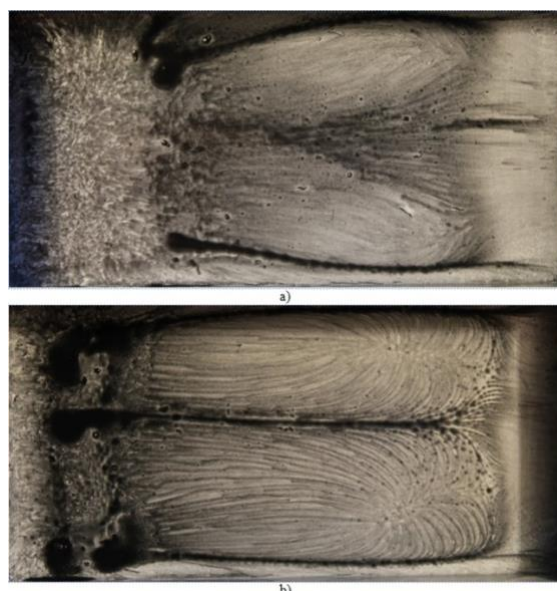


Рис. 9. Структура течения на дне каверны. Сажемасляная визуализация.
 $M=0.3$ (a) и $M=0.7$ (b)

Подобные структуры течений также визуализируется методом ЖК покрытия, чувствительного к поверхностному трению (рис. 10-11).

Кроме качественного определения направления линий тока, в отличие от сажемасляной визуализации, на этих изображениях можно наблюдать изменение цвета ЖК покрытия. Под влиянием трения на участках с более высоким уровнем касательных напряжений происходит смещение длины волны отраженного света в синюю область спектра. В областях отрыва цвет покрытия остается первоначальным. Можно отметить более выраженное изменение цвета ЖК покрытий при числах маха 0,7 и 2. Это может быть обусловлено увеличением величины касательного напряжения из-за наличия высокоинтенсивных пульсаций параметров течения внутри каверны.

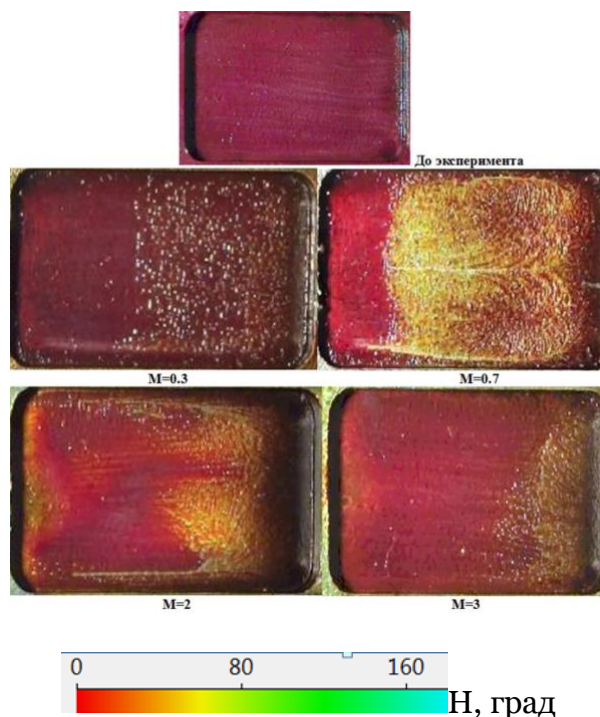


Рис.10. Структура течения на дне каверны. ЖК покрытие, чувствительное к касательным напряжениям. Направление потока слева направо.



Рис. 11 Картина предельных линий тока через 60 и 80 с после выключения потока.
 $M=0.7$

При $M = 2$ картина трехмерного течения в каверне стала заметно асимметричной, наблюдаемый размер застойной области увеличился по сравнению с дозвуковыми скоростями течения. Желтый цвет ЖК покрытия в зоне растекания указывает на меньший уровень касательных напряжений при такой скорости потока, чем при $M = 0,7$.

Следует отметить, что изменение расстояния от сопла рабочей части до каверны, т.е. толщины пограничного слоя у передней кромки (в рамках данного эксперимента) не влияет на структуру потока (рис. 12).

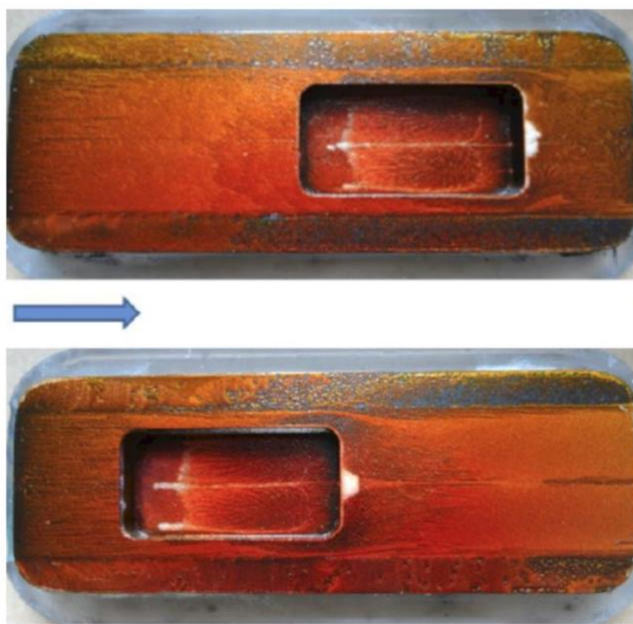


Рис. 12. Влияние расстояния до каверны на картину течения ($M = 0,7$)

Полученная с помощью ЖК информация позволяет оптимально перейти к локальным инструментальным измерениям на исследуемой поверхности (термопары, поверхностные датчики).

Рассмотрим далее результаты, полученные методом термочувствительных ЖК покрытий с номинальным диапазоном чувствительности $\Delta T = 15 \div 17^\circ\text{C}$. На рис.13 показана временная зависимость оптического отклика ЖК в ходе пуска длительностью около 90 сек при $M = 2$. Участки красного цвета соответствуют повышенной теплоотдаче от поверхности к газу, соответственно участки синего цвета - пониженной теплоотдаче. Несмотря на то, что перепад температур в ходе эксперимента по поверхности пластины несколько больше динамического диапазона используемого ЖК ($\Delta T = 2^\circ\text{C}$) и визуально не вся поверхность пластины окрашена одновременно, температурный отпечаток структуры сверхзвукового течения на пластине и в каверне

был получен. Карты цветового тона также показывают, что данный диапазон рабочих температур ЖК позволяет практически полностью получить распределение мгновенной температуры в камере.

Как известно, имея локальную зависимость температуры от времени $T(x,y,t)$ при определенных граничных условиях на поверхности, можно также получить плотность теплового потока.

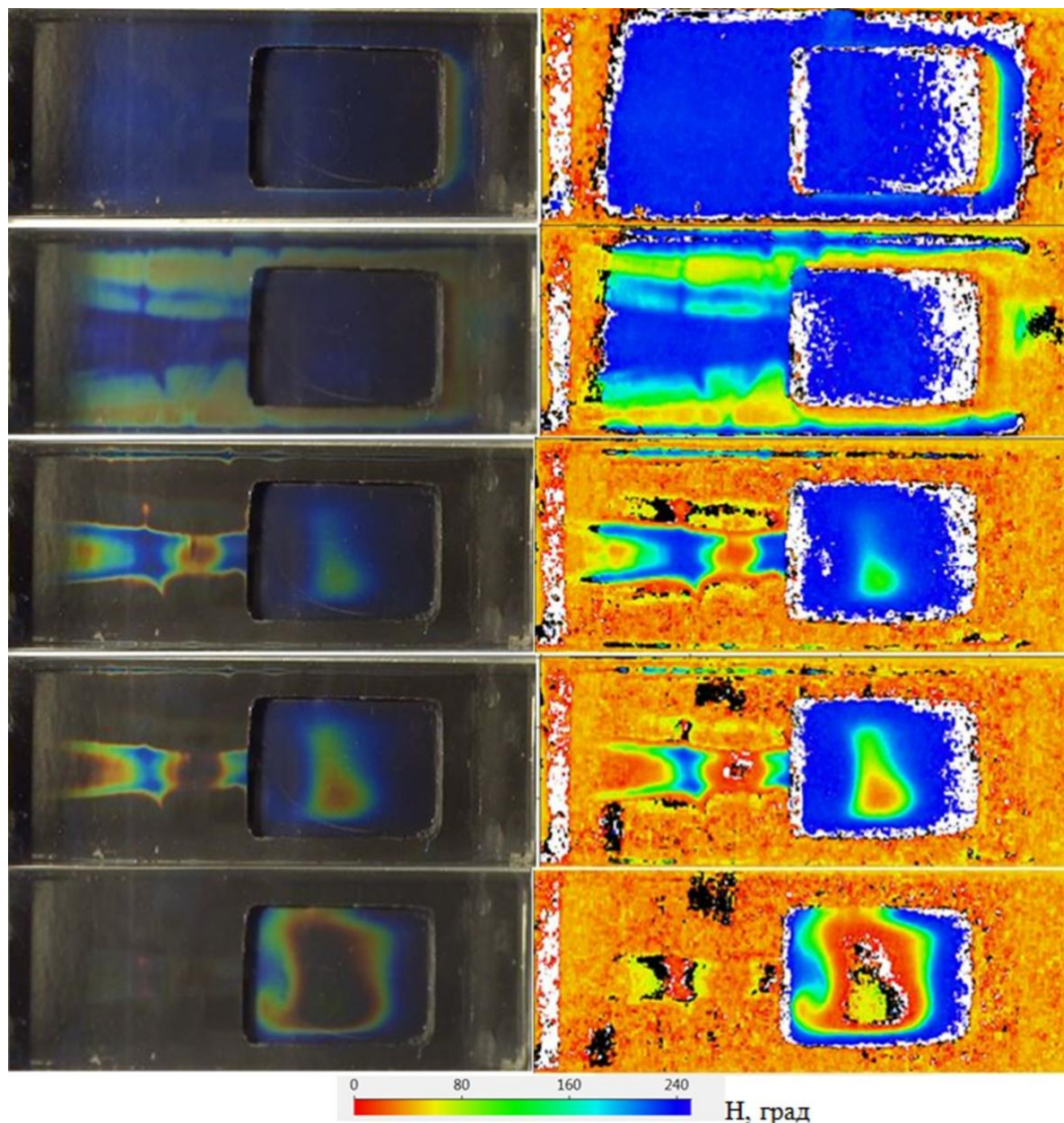


Рис. 13. Изменение ЖК термограмм в ходе эксперимента (сверху вниз) при $M = 2$ (слева) и соответствующие карты цветового тона (справа)

На рис. 14 показаны ЖК визуализация поля температур и карты цветового тона при числа Маха: 0,7, 2, 3 и 4. Видно, что, максимум теплоотдачи при $M = 3$ и 4 происходит в областях, соответствующих центрам областей растекания (см. рис. 9 б), не смотря на отсутствие резонанса при $M = 3$. В этих положениях охлаждение максимально и модель имеет красный цвет. В то же время при дозвуковой скорости набегающего потока ($M = 0,7$) наблюдается только одна область повышенной теплоотдачи в районе центра камерны, соответствующая области повышенных значений касательных напряжений (см. рис. 10 б). Это может быть обусловлено перераспределением массового расхода у

дна каверны вследствие увеличения скорости и уменьшения плотности потока, интенсификацией теплообмена вблизи задней стенки из-за увеличения уровня пульсаций, генерируемых на задней кромке более скоростным слоем смешения.

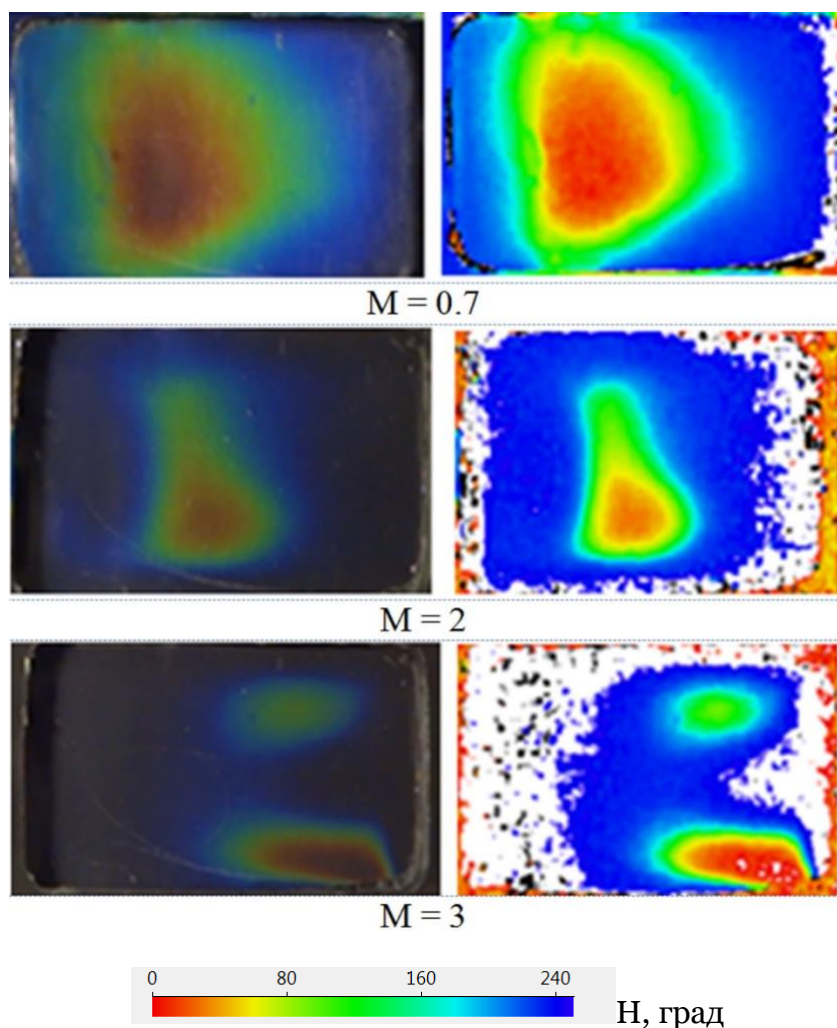


Рис. 14. ЖК визуализация поля температур (слева) и карты цветового тона при различных числах Маха (справа)

5. Заключение

В работе приведены результаты тестирования двух типов ЖК покрытий, чувствительных к температуре или касательному напряжению поверхностного трения, и описание методов их применения для визуализации панорамного распределения этих параметров на примере течения в мелкой каверне.

Использование покрытий на основе чистых ЖК позволяет получить поверхностные линии тока аналогично методу сажемасляной визуализации, при этом дополнительно имеется возможность качественно сравнить величины касательных напряжений на различных участках модели.

Оба типа ЖК покрытий позволили детектировать особенности топологии пристеночного дозвукового течения на исследуемой поверхности, а также структуру сверхзвуковой струи и ее очертания на поверхности модели в зависимости от времени. Кроме топологии метод термочувствительных ЖК пленок позволяет изучать теплоотдачу, что является актуальным при применении в ряде технологических процессов.

Результаты визуализации температурных полей показали, что при дозвуковых скоростях набегающего потока максимальный теплообмен имеет место в средней части

каверны, где скорость пристенного течения максимальна. При сверхзвуковых скоростях, области максимального теплообмена соответствуют зонам присоединения.

Благодарности

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации 121030500158-0).

Список литературы

1. Disimile P., Toy N., Savory E. Effect of planform aspect ratio on flow oscillations in rectangular cavities // Journal of Fluids Engineering-transactions of The Asme - J FLUID ENG. 2000. Vol. 122. DOI:10.1115/1.483223.
2. Mendoza J., Ahuja K. Effects of cavity dimensions, boundary Layer, and temperature on cavity noise with emphasis on benchmark data to validate computational aeroacoustic codes. 1995. 261 p.
3. Дьяченко А.Ю., Терехов В.И., Ярыгина Н.И. Обтекание турбулентным потоком поперечной каверны с наклонными боковыми стенками. 2. Теплообмен // Прикладная механика и техническая физика. 2007. Vol. 48, № 4. С. 23-29.
4. Savory E., Toy N., Okamoto S., Yamanishi Y. The internal flow field associated with yawed three-dimensional rectangular cavities // Journal of Flow Visualization and Image Processing. 2000. Vol. 7. № 3. P. 217-229.
5. Czech M., Savory E., Toy N., Mavrides T. Flow regimes associated with yawed rectangular cavities // The Aeronautical Journal. Cambridge University Press, 2001. Vol. 105. № 1045. P. 125-134.
6. Миронов Д.С. Экспериментальное исследование пульсаций давления, генерируемых мелкой открытой каверной, с применением частотно-временных методов обработки данных // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Vol. 18. № 3. С. 385-395.
7. Grace M.S., Dewar W.G., E. Wroblewski D. Experimental investigation of the flow characteristics within a shallow wall cavity for both laminar and turbulent upstream boundary layers // Experiments in Fluids. 2004. Vol. 36. № 5. P. 791-804.
8. Миронов Д.С. Возникновение резонанса при трансзвуковом обтекании мелкой трехмерной каверны // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник трудов. Казань, 2015. С. 2568-2570.
9. Жаркова Г.М., Коврижина В.Н. Панорамная диагностика поверхностных температур и тепловых потоков в аэродинамическом эксперименте // Инженерно-физический журнал. 2010. Vol. 83. № 6. С. 1072-1083.
10. Жаркова Г.М., Коврижина В.Н., Петров А.П., Подъячев С.П. Панорамная диагностика касательных напряжений на стенке канала с выступом с помощью жидких кристаллов // Теплофизика и аэромеханика. 2016. №6. С. 865-873.
11. Жаркова Г.М., Коврижина В.Н., Петров А.П., Мошаров В.Е., Радченко В.Н., Шаповал Е.С. О применении жидких кристаллов для визуализации структуры пристенного течения в экспериментальной аэродинамике // Результаты фундаментальных исследований в прикладных задачах авиастроения. Сборник статей. М.: Российская академия наук («Наука» РАН). 2016. С. 113-125. ISBN 978-5-9908169-6-1.
13. Zharkova G.M., Kovrizhina V.N., Petrov A.P. Panoramic temperature, pressure, and shear stress sensors based on liquid crystal composites // Polymer Science, Series C. 2018. Vol. 60. No. 1. P. 14-22.
14. Жаркова Г.М., Коврижина В.Н. Механо-оптические эффекты в жидких кристаллах и их использование для измерения касательных напряжений в аэродинамическом эксперименте // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2022. Т.22. №3. С. 5-14.

15. Беляков В.А., Сонин А.С. Оптика холестерических жидких кристаллов. М.: Наука, 1982. 360 с.
16. Жаркова Г.М., Коврижина В.Н., Подъячев С.П. Анализ и интерпретация данных видеорегистрации экспериментов с ЖК покрытиями // Научная визуализация. 2017. Vol. 9. № 3. С. 96-102.
17. Mironov D.S., Lebiga V.A., Zharkova G.M., Kovrizhina V.N., Petrov A.P. Investigation of flow features in a rectangular cavity using panoramic visualization methods // AIP Conference Proceedings. 2023. V. 2504. No. 030036. (doi: 10.1063/5.0132807).
18. Rossiter J.E. Wind-Tunnel Experiments on the Flow over Rectangular Cavities at Subsonic and Transonic Speeds. 1964.
19. Heller, H.H., Bliss, D.B. The Physical Mechanism of Flow-Induced Pressure Fluctuations in Cavities and Concepts for Their Suppression // AIAA Paper 75-0491. 1975.
20. Ahuja, K.K., Mendoza, J. Effects of Cavity Dimensions, Boundary Layer and Temperature on Cavity Noise With Emphasis on Benchmark Data To Validate Computational Aeroacoustic Codes // CR 4653. National Aeronautics and Space Administration. 1995.

Liquid Crystal Visualization in The Study of the Flow in a Shallow Cavity

G.M Zharkova¹, V.N. Kovrizhina², D.S. Mironov³, A.Yu. Pak⁴, A.P. Petrov⁵

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS

¹ ORCID: 0000-0002-0173-2962, zharkova@itam.nsc.ru

² ORCID: 0000-0002-0948-4481, kovrizhina@itam.nsc.ru

³ ORCID: 0000-0001-7316-4282, mironov_ds@itam.nsc.ru

⁴ ORCID: 0009-0004-1947-1651, pak@itam.nsc.ru

⁵ ORCID: 0000-0002-2683-8114, petrov@itam.nsc.ru

Abstract

Using the example of a flow around a shallow cavity, the possibilities of liquid-crystal visualization at subsonic and supersonic flow velocities are demonstrated. To determine the flow structure at the bottom of the cavity, a coating based on a composition of pure cholesteric liquid crystals (ChLC) was used. To determine the distribution of temperatures and heat fluxes, thermosensitive films formed by encapsulation of ChLC in a polymer matrix were used.

Based on the experimental results, the influence of the Mach number on the spatial pattern of the flow inside the cavity and the temperature distribution at the bottom of the cavity was obtained. The pattern of surface streamlines obtained by the LC coating coincides with that obtained using the oil film visualization. In this case, the LC method makes it possible to compare the values of shear stresses in different parts of the surface also. It is found that the occurrence of resonance phenomena leads to restructuring of the flow inside the cavity and a change in the values of shear stresses. It is shown, that in subsonic flow around the zone of increased heat transfer is concentrated near the axis of symmetry of the cavity.

Keywords: liquid crystals, shallow cavity, temperature, shear stress, oil film visualization, Rossiter pulsations.

References

1. **Disimile P., Toy N., Savory E.** Effect of planform aspect ratio on flow oscillations in rectangular cavities // Journal of Fluids Engineering-transactions of The Asme - J. FLUID ENG. 2000. Vol. 122. DOI:10.1115/1.483223.
2. **Mendoza J., Ahuja K.** Effects of cavity dimensions, boundary Layer, and temperature on cavity noise with emphasis on benchmark data to validate computational aeroacoustic codes. 1995. 261 p.
3. **Dyachenko A.Yu., Terechov V.I., Yarygina N.I.** Obtekanie turbulentnym potokom poperechnoi kaverny s naklonnymi bokovymi stenkami. 2.Teploobmen.// Prikladnaya mekhanika i texnicheskaya phisika. 2007. Tom 48, № 4, C.23-29.(In Russian)
4. **Savory E., Toy N., Okamoto S., Yamanishi Y.** The internal flow field associated with yawed three-dimensional rectangular cavities // Journal of Flow Visualization and Image Processing. 2000. Vol. 7. № 3. P. 217-229.
5. **Czech M., Savory E., Toy N., Mavrides T.** Flow regimes associated with yawed rectangular cavities // The Aeronautical Journal. Cambridge University Press, 2001. Vol. 105. № 1045. P. 125-134.

6. **Mironov D.S.** Experimental investigation of pressure fluctuations generated by a shallow open cavity using time-frequency methods of data processing // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2011. Vol. 18. № 3. C. 385-395.
7. **Grace M.S., Dewar W.G., E. Wroblewski D.** Experimental investigation of the flow characteristics within a shallow wall cavity for both laminar and turbulent upstream boundary layers // *Experiments in Fluids*. 2004. Vol. 36. № 5. P. 791-804.
8. **Mironov D.S.** The emergence of resonance in the transonic flow of a shallow three-dimensional cavity // *XI All-Russian Congress on fundamental problems of theoretical and applied mechanics: proceedings*. Kazan, 2015. pp. 2568-2570.
9. **Zharkova G.M., Kovrizhina V.N.** Panoramic diagnostics of surface temperatures and heat fluxcoolest in an aerodynamic experiment // *Engineering Physics Journal*. 2010. Vol. 83. № 6. C. 1072-1083.
10. **Zharkova G.M., Kovrizhina V.N., Petrov A.P., Podyachev S.P.** Panoramic diagnostics of tangential stresses on the channel wall with a protrusion using liquid crystals // *Thermophysics and aeromechanics*. 2016. No.6. pp. 865-873.
11. **Zharkova G.M., Kovrizhina V.N., Petrov A.P., Mosharov V.E., Radchenko V.N., Shapoval E.S.** On the use of liquid crystals to visualize the structure of wall flow in experimental aerodynamics // *Results of fundamental research in applied problems of aircraft engineering. Collection of articles*. Moscow: Russian Academy of Sciences ("Science" of the Russian Academy of Sciences). 2016. pp. 113-125. ISBN 978-5-9908169-6-1.
13. **Zharkova G.M., Kovrizhina V.N., Petrov A.P.** Panoramic temperature, pressure, and shear stress sensors based on liquid crystal composites // *Polymer Science, Series C*. 2018. Vol. 60. No. 1. P. 14-22.
14. **Zharkova G.M., Kovrizhina V.N.** Mechano-optical effects in liquid crystals and their use for measuring tangential stresses in an aerodynamic experiment // *Liquid crystals and their practical use*. 2022. Vol.22. No.3. pp. 5-14.
15. **Belyakov, Sonin A.S.** Optics of cholesterol liquid crystals. M., Nauka, 1982. 360 p.
16. **Zharkova G.M., Kovrizhina V.N., Podyachev S.P.** Analysis and interpretation of video recording data of experiments with LCDD coatings // *Scientific visualization*. 2017. Vol. 9. No. 3. pp. 96-102.
17. **Mironov D.S., Lebiga V.A., Zharkova GM., Kovrizhina V.N., Petrov A.P.** Investigation of flow features in a rectangular cavity using panoramic visualization methods // *AIP Conference Proceedings*. 2023. V. 2504. No. 030036. (doi: 10.1063/5.0132807).
18. **Rossiter J.E.** Wind-Tunnel Experiments on the Flow over Rectangular Cavities at Subsonic and Transonic Speeds. 1964.
19. **Heller, H.H., Bliss, D.B.** The Physical Mechanism of Flow-Induced Pressure Fluctuations in Cavities and Concepts for Their Suppression // *AIAA Paper 75-0491*. 1975.
20. **Ahuja, K.K., Mendoza, J.** Effects of Cavity Dimensions, Boundary Layer and Temperature on Cavity Noise With Emphasis on Benchmark Data To Validate Computational Aeroacoustic Codes // CR 4653. National Aeronautics and Space Administration. 1995.