

## **Анализ больших массивов данных при визуализации динамических тепловых полей**

И.А. Знаменская<sup>1</sup>, А.М. Шагианова<sup>2</sup>, Е.Ю. Коротеева<sup>3</sup>, М.И. Муратов<sup>4</sup>,  
П.А. Рязанов<sup>5</sup>

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-6362-9496, [znamen@phys.msu.ru](mailto:znamen@phys.msu.ru)

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-2216-4503, [shagiyanova@physics.msu.ru](mailto:shagiyanova@physics.msu.ru)

<sup>3</sup> ORCID: 0000-0002-1705-5142, [koroteeva@physics.msu.ru](mailto:koroteeva@physics.msu.ru)

<sup>4</sup> ORCID: 0000-0002-6545-5829, [muratov583@gmail.com](mailto:muratov583@gmail.com)

<sup>5</sup> ORCID: 0000-0002-2003-6225, [pa.ryazanov@physics.msu.ru](mailto:pa.ryazanov@physics.msu.ru)

### **Аннотация**

В данной работе на примере использования визуализации нестационарных тепловых полей с помощью инфракрасной термографии высокого разрешения рассмотрены две экспериментальные задачи теплофизики с различными временными и пространственными характеристиками. Исследованы: 1. пристеночная область течения импактной неизотермической струи жидкости и 2. тепловые потоки от стенки канала при прохождении ударной волны. Оба процесса относятся к быстропротекающим в жидкости и газе, соответственно, и их исследование предполагает получение и анализ больших массивов визуальных данных.

Для неизотермического смешения импактной затопленной струи жидкости проведен анализ течения в пристеночной области вблизи ИК-прозрачного окна. Представлены термограммы, визуализирующие вихревое неизотермическое течение в пристеночной области; построены энергетические спектры температурных пульсаций для различных параметров и областей течения импактной струи. Для задачи течения газа в ударной трубе исследован тепловой поток с участков наружной стенки с различной теплопроводностью и излучательной способностью при прохождении ударной волны.

Обсуждаются подходы, позволяющие оптимизировать регистрацию и анализ больших массивов визуальных данных, несущих полезную информацию об изучаемых теплофизических процессах.

**Ключевые слова:** термографическая визуализация, обработка результатов, тепловое излучение.

## **1. Введение**

При исследовании панорамными методами динамических процессов в плазме, газах, жидкостях и многофазных средах на основе современных цифровых камер возникают проблемы, связанные с наличием больших массивов цифровых данных, несущих полезную информацию об изучаемых физических процессах. По мере постоянного совершенствования цифровой аппаратуры увеличивается и объем получаемой исследователем информации. В каждом опыте возможно получение десятков тысяч новых изображений, представляющих интерес для исследователей и научного сообщества при условии грамотного с физической точки зрения анализа и интерпретации. Это ведет к появлению новых задач, связанных с сохранением, систематизацией, обработкой, анализом, представлением результатов визуального эксперимента.

Большое количество информации и развитие технологий по её хранению и передаче способствовало внедрению в процессы анализа и обработки машинного обучения. Тем не менее при получении новых знаний об объекте исследования в уникальных экспериментальных условиях подключение машинного обучения пока представляется проблематичным [1]. Особенно это касается задач, для которых численное решение пока недоступно, и сложно получить изначальные синтезированные данные, необходимые для обучения. Кроме того, машинное обучение всё ещё достаточно ресурсоёмко для всеобщего применения и не всегда дает лучшие результаты, чем классические методы анализа визуализированных данных.

Развитие тепловизионной техники нового поколения позволило регистрировать двумерные тепловые поля в динамике с высоким пространственным и временным разрешением. В данной работе мы рассмотрим некоторые результаты, полученные с помощью средневолновой инфракрасной (ИК) съемки с применением программ обработки данных.

Термография широко используется для исследований тепловых потоков с поверхностей твердых тел [2, 3] и в гидродинамике [4, 5]. Другое направление применения термографии – регистрация тепловых полей на поверхности жидкости [6 – 9]. Вода поглощает средневолновое ИК-излучение в тонком субмиллиметровом слое, этот эффект позволяет визуализировать структуры на поверхности жидкости. В литературе преимущественно встречаются работы, посвященные медленным течениям с малыми числами Рейнольдса, либо стационарным течениям. Для исследования жидких сред инфракрасная термография часто используется одновременно с другими методами визуализации, например, цифровым трассированием или томографией [10].

В работе [11] с помощью ИК-термографии и цифровой анемометрии по изображению частиц проведен анализ структуры свободной жидкой струи, падающей на металлическую пластину. Совместное использование средневолновой и ближней инфракрасной термографии [12] применяется для исследования жидких пленок. В названных работах термографические данные отражают свойства течения на поверхности раздела газ-жидкость, либо результат воздействия затопленного течения.

Тепловизоры доказали свою эффективность в анализе динамики сложных неизо-термических течений благодаря возможности высокоскоростной съемки – частота регистрации может достигать несколько кГц в зависимости от пространственного разрешения. Современные приборы обладают высокой чувствительностью (до 20 мК) [13], что с успехом используется для изучения теплообмена, в частности, вызванного турбулентным течением.

Ранее был предложен метод термографии высокоскоростных потоков [14], в результате его применения к исследованиям ряда модельных струйных течений получены большие массивы экспериментальных данных. Метод предполагает проведение тепловизионной регистрации через ИК-прозрачную стенку резервуара из пограничного слоя жидкости. В таком случае индикатором движения потока выступают турбулентные вихревые структуры с разными температурами. Полученные предложенным методом количественные данные для турбулентных пограничных слоев струйных течений могут быть, в частности, использованы для численных расчетов при верификации результатов численного моделирования турбулентных течений [15].

## **2. Тепловизионная регистрация**

Большинство используемых в настоящее время тепловизоров работают в средневолновой (3 - 5 мкм) и длинноволновой (8 - 14 мкм) спектральных полосах. В данной работе для панорамной регистрации динамических тепловых полей использовалась тепловизионная камера FLIR SC7700, работающая в средневолновом ИК-диапазоне 3.7-4.8 мкм. Этот прибор обладает высокой температурной чувствительностью (NETD) до 20 мК. Для полнокадрового режима (640x512 пикселей) максимальная частота съемки

– 115 Гц, при ограничении разрешения – до 400 Гц. Пространственное разрешение для описываемых экспериментов составляет 0.08 - 0.15 мм/пиксель.

Увеличение объемов полученных результатов привело к возникновению новой проблемы – задаче рационального подхода к регистрации, обработке и хранению массивов данных визуализации. Для тепловизора съемка длительностью  $t = 1$  с и пространственным разрешением 348x344 пикселей на частоте  $f = 295$  Гц занимает 60 Мб. Выбор короткого временного отрезка для регистрации возможен только для исследования стационарных течений. При анализе нестационарных течений требуется длительная съемка, обеспечивающая непрерывную регистрацию нестационарной фазы процесса. Тепловизионный «фильм» длительностью  $t = 600$  с при  $f = 100$  Гц и разрешении 640x512 пикселей занимает уже около 40 Гб.

### **3. Примеры пост-обработки динамических тепловых полей**

В данной работе демонстрируется применение инфракрасной термографии для исследования двух динамических процессов в различных временных и пространственных диапазонах: турбулентное струйное течение жидкости и прохождение ударной волны в газе. Исследование неизотермического смешивания жидкости на поверхности ИК-прозрачной стенки позволяет изучать гидродинамическую структуру течения на основе полученных данных о тепловых пульсациях в приповерхностной области импактной затопленной струи. При прохождении ударной волны по каналу регистрируется тепловой отклик на твердой стенке газодинамического стенда. Обе задачи связаны с панорамной регистрацией поля течения и получением, обработкой, анализом большого объема визуальной информации. Первичная обработка осуществлялась на основе программного обеспечения FLIR Altair. Затем, в соответствии с параметрами эксперимента, выбирались методы для дальнейшего количественного анализа массивов данных.

#### **3.1. Пристеночная область импактной неизотермической струи жидкости**

Большинство экспериментальных работ, посвященных теплообмену струй с твердой стенкой, основаны на регистрации теплового поля самой стенки. Измерения в среде сталкиваются с ограничениями метода, например конечной толщиной лазерного ножа, или его использованием вблизи стенки при наличии больших градиентов. Инфракрасная термография позволяет визуализировать непосредственно пристеночный слой турбулентного течения жидкости через ИК-прозрачное окно.

В данной работе эксперименты проходились для сопел  $D = 1 - 4$  мм, скоростей потока  $u_{jet} = 0.7 - 10$  м/с и чисел Рейнольдса  $Re_{jet} = 5000 - 35000$ , рассчитанных для значений при выходе из сопла. Расстояние от среза сопла до поверхности соударения варьировалось  $H/D = 1 - 6$ . Регистрация велась через ИК-прозрачное окно толщиной 2 мм из фторида кальция с пропускающей способностью более 90%.

Известно, что в пристеночной области импактной струи можно выделить три характерные области течения: область торможения потока, пристеночную область течения и область отрыва потока. Пост-обработка термографических фильмов позволяет выделить закономерности динамики параметров в определенных зонах течений.

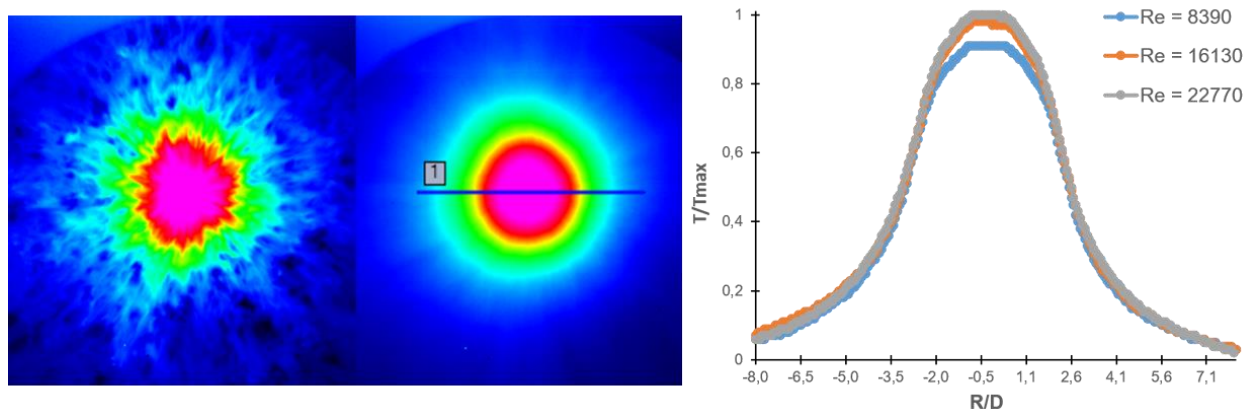


Рис. 1. (слева - направо) мгновенная термограмма, усредненная термограмма ( $N = 256$  кадров) и температурные профили вдоль линии 1 для различных скоростей потока для  $H/D = 2$ .

Стационарная составляющая неизоэтермического течения вблизи импактной поверхности визуализирована с помощью усредненных термограмм и профилей температуры. В области торможения потока нормальная к поверхности соударения скорость достигает нуля, профиль температуры выходит на плато. Форма профиля зависит от диаметра сопла и расстояния от сопла до поверхности соударения, а высота – от числа Рейнольдса (рис. 1). В области торможения потока пульсаций температуры практически не наблюдается (точка 1 на рис. 2).

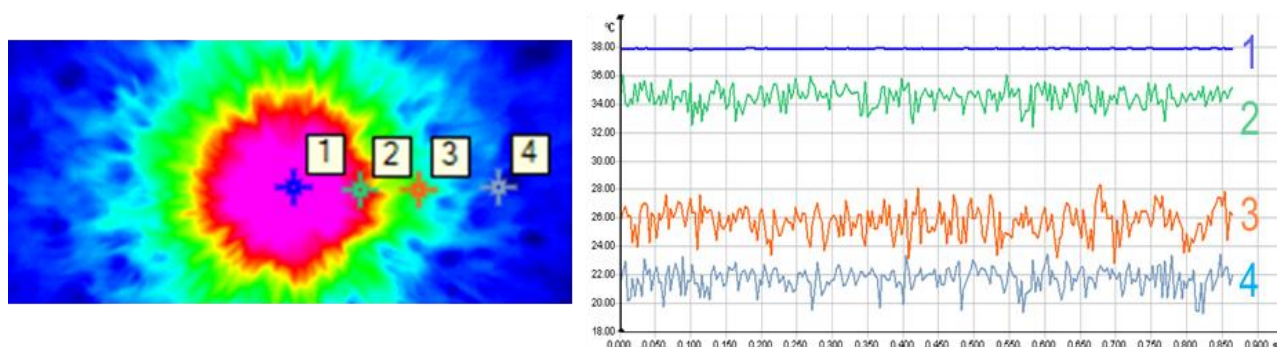


Рис. 2. Пример термограммы и временной развертки температуры на четырех разных расстояниях от точки торможения:  $R/D = 0.2, 1.5, 3$  и  $5$ .

Однако при анализе турбулентных течений особый интерес вызывает анализ мгновенных изображений, например, расчет частотных характеристик пульсаций. Усредненные термограммы возможно получить и с помощью других экспериментальных методов, например, при регистрации потока через тонкую фольгу [13, 16]. Мгновенные и средние поля скорости и температуры в пристеночной области осесимметричной турбулентной струи были измерены с помощью методов PIV и PLIF [17, 18]; показано, в частности, что, варьируя частоту внешнего возбуждения струи, можно регулировать интенсивность турбулентного переноса в области натекания струи на стенку.

На основе регистрации нестационарных полей пульсаций температуры жидкости исследована переходная область течения импактной струи. На рис. 2 показан пример временной развертки пульсаций температуры на четырех разных расстояниях ( $R$ ) от точки торможения. Наблюдаемые колебания температуры сопоставлены процессу смешивания жидких изотермических элементов, поскольку характерные времена турбулентного перемешивания много меньше времен процессов теплопроводности и естественной конвекции.



Визуализированы структуры в пристеночном течении (рис. 3), полученные вычитанием усредненного кадра: их форма и расположение в переходной области может давать информацию о вихревом перемешивании пристеночного слоя. Размеры и форма структур зависят от параметров течения круглой струи: числа Рейнольдса  $Re_{jet}$  и относительного расстояния от среза сопла до поверхности соударения  $H/D$  [19].

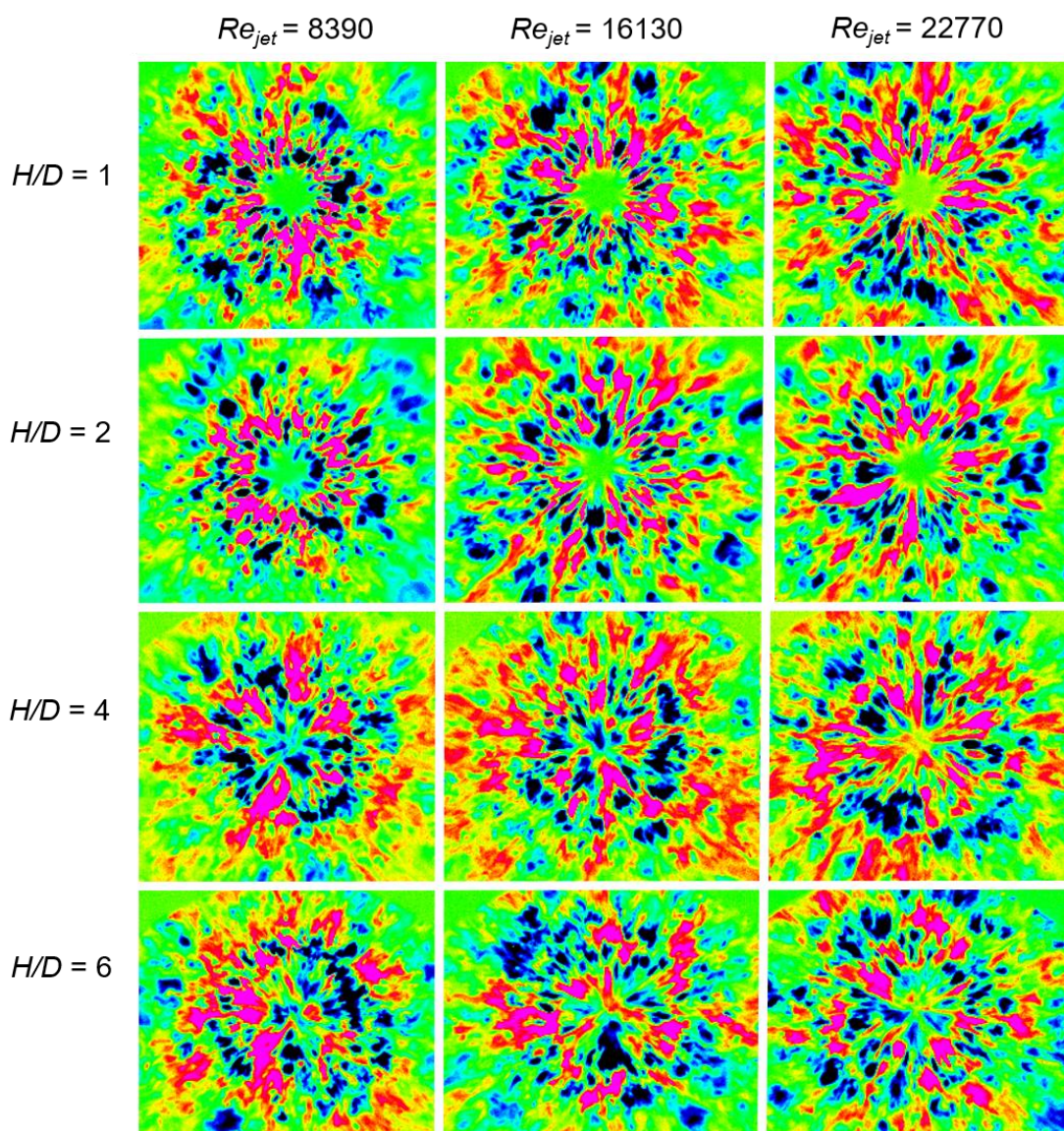


Рис. 3. Мгновенные термограммы пристеночной области импактной струи, полученные с помощью вычитания усредненного кадра, для  $Re_{jet} = 8390, 16130, 22770$  и  $H/D = 1, 2, 4, 6$ .

Также проведен расчет среднеквадратичных пульсаций интенсивности [20] в пограничном слое жидкости, и получены значения радиуса максимальных пульсаций.

Обработка полученных массивов визуальных данных выполняется с помощью построения спектров тепловых пульсаций турбулентного пограничного слоя жидкости. В выбранных точках потока регистрируются временные развертки пульсаций температуры, по которым строятся энергетические спектры в интервале частот от 1 до 150 Гц. По их форме и при сравнении с известными моделями турбулентности можно говорить об особенностях областей течения и ламинарно-турбулентном переходе. На рис. 4 представлены примеры энергетических спектров в характерных областях течения импактной струи ( $D = 3$  мм,  $H/D = 3$ ,  $v_{jet} = 2,4$  м/с,  $Re_{jet} = 7700$ ).

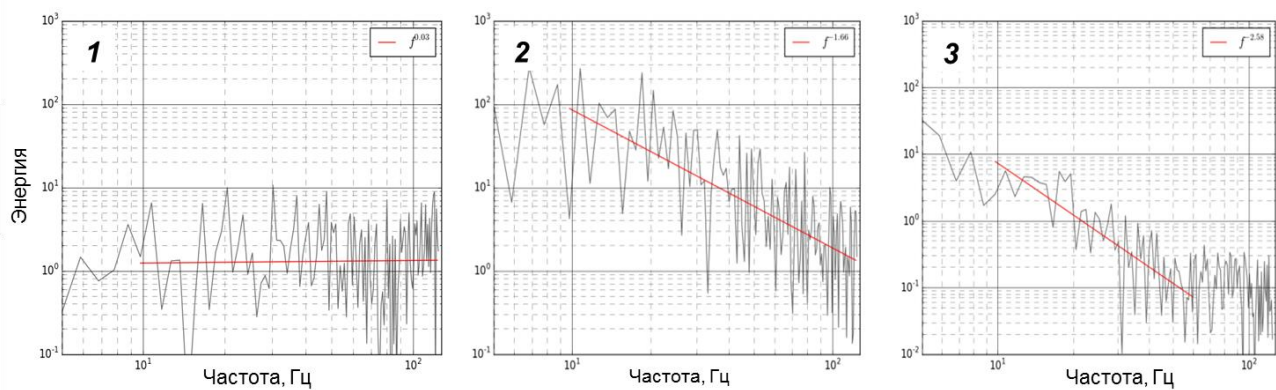


Рис. 4. Типичные энергетические спектры температурных пульсаций в трех выбранных точках течения на разных расстояниях от точки торможения потока:

1 -  $R/D \sim 0$ ; 2 -  $R/D \sim 4$ ; 3 -  $R/D \sim 8$ .

Критерием анализа энергетических спектров в данном исследовании является их наклон, рассчитанный по методу наименьших квадратов. При распространении потока от точки торможения в радиальном направлении на пристеночное течение воздействуют вихревые структуры разных масштабов извне, изменяя турбулентные свойства течения в визуализируемой области. Пример визуализации 3D карты наклонов спектров представлен на рис. 5. Цвет соответствует наклону спектра, и в общем виде поверхность имеет колоколообразную форму. На расстоянии 3 – 6 относительных диаметров от места импакта становится возможным выделить участок, сопоставимый классическому степенному закону Колмогорова «-5/3» и соответствующий появлению инерционного интервала [21].

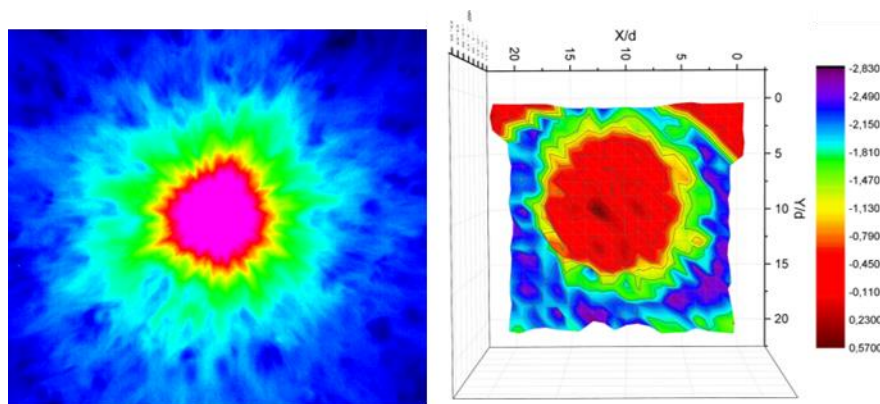


Рис. 5. Карта степенных наклонов спектров пристеночной области импактной затопленной струи (справа) для области  $10 \times 10 R/D$  (представлена слева).

Другой способ пост-обработки массивов термографических данных – трассирование тепловыми точками, рассмотрен в работе [22]. Поля скорости турбулентных неизотермических потоков жидкости получены с помощью применения кросс-корреляционных алгоритмов.

Предварительный анализ характерных времен процесса и пространственных масштабов необходим для оптимизации параметров съемки. Выбор времени регистрации, частоты съемки, пространственного разрешения, а также метода обработки результатов в соответствии с постановкой задачи и конкретной областью течения приведет к рациональному использованию ресурсов. По итогам анализа экспериментальных данных процесс пост-обработки можно представить в виде схемы (рис. 6).



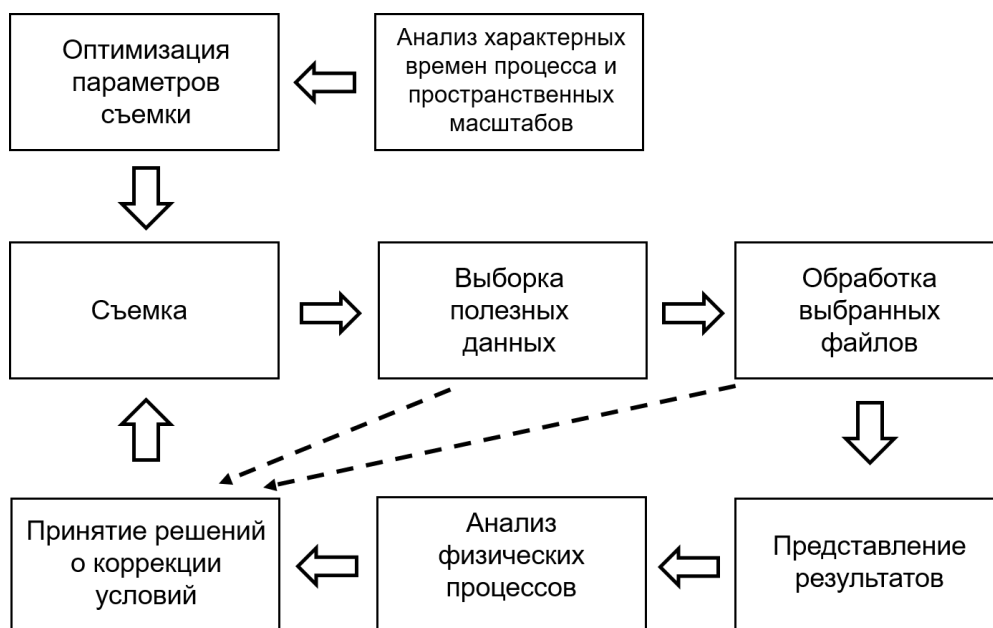


Рис. 6. Схема работы с экспериментальными данными.

### 3.2. Нагрев ударной волной стенки канала

В данной задаче тепловизионная съемка применена для исследования изменения тепловых потоков на стенке прямоугольного канала ударной трубы сечением 24x48 мм<sup>2</sup>; получена динамика нагрева боковой и торцевой стенки канала после прохождения ударной волны.

Оптическая ось ИК-регистрации была направлена перпендикулярно главной оси ударной трубы (рис. 7); регистрировалось излучение из областей вертикальной медной стенки трубы высотой 24 мм толщиной 2 мм в секции камеры низкого давления. Исследовалась динамика нагрева наружной стенки за счет теплопроводности после прохождения ударной волны в канале. Температура потока в канале за ударной волной определялась на основании соотношений Рэнкина – Гюгонно [23].

Широкий спектр чисел Маха в ударной трубе достигается посредством изменения материалов диафрагмы, а также начальных давлений в камерах высокого и низкого давления. Длительность прохождения ударно-нагретого потока мимо области регистрации составляла 300 - 400 мкс, после чего проходила контактная поверхность и волна разрежения.

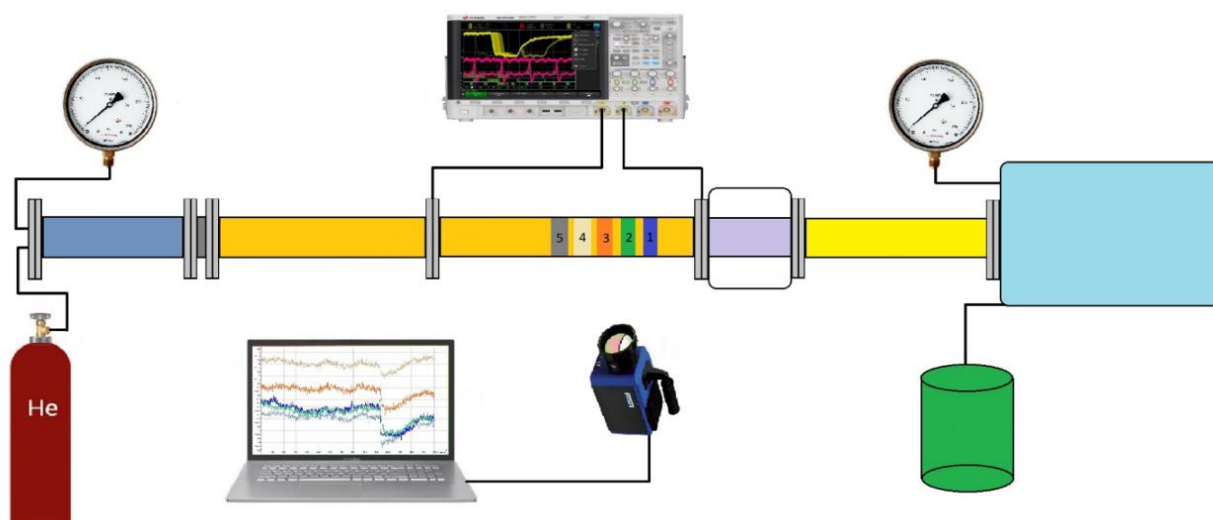


Рис. 7. Экспериментальная установка для газодинамического стенда.

Тепловизором регистрировалось излучение из 5 областей опроса, которыми являлись нанесенные на боковую поверхность трубы материалы с различной теплопроводностью и излучательной способностью. Покрытия: 1 – слой, зачерненный матовой аэрозольной краской, 2 – черная изоленга, 3 – белый малярный скотч, 4 – чистая поверхность медной трубы и 5 – слой, зачерненный фломастером. На рис. 8 приведено мгновенное тепловизионное изображение стенки ударной трубы.

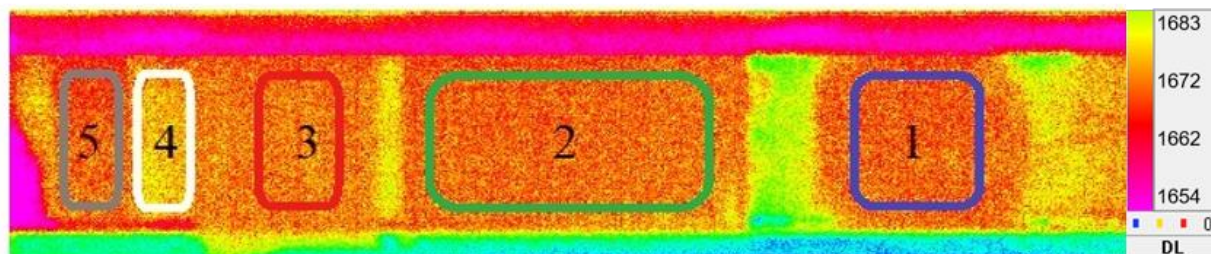


Рис. 8. Тепловизионное изображение участка ударной трубы с различными покрытиями

Для чисел Маха из диапазона  $M = 1,9 - 3,5$  проводилась регистрация тепловизионных фильмов длительностью 5 секунд объемом от 350 Мб. Частота съемки была максимальной (до  $f = 400$  Гц) ввиду малых характерных времен процессов внутри канала. Регистрировались процессы, обусловленные теплопроводностью стенок канала, нагретых изнутри потоком. Обработка осуществлялась на основе программного обеспечения FLIR Altair. На рис. 9 приведены кривые зависимости от времени изменения температуры в точках, в центрах пяти зон опроса.

Ввиду различных коэффициентов теплопроводности покрытий временные и температурные параметры для различных областей опроса отличаются (рис. 9). Тот факт, что регистрируемая начальная температура металла и белого скотча несколько выше других материалов, объясняется большим значением коэффициента отражения данных материалов. Также толщина изоленги и скотча не позволяет регистрировать скачкообразное повышение температуры за ударной волной, в то время как изменение температуры на двух черных покрытиях позволило провести аналогию с классической  $X - t$  диаграммой решения уравнений для ударной трубы (рис. 10).

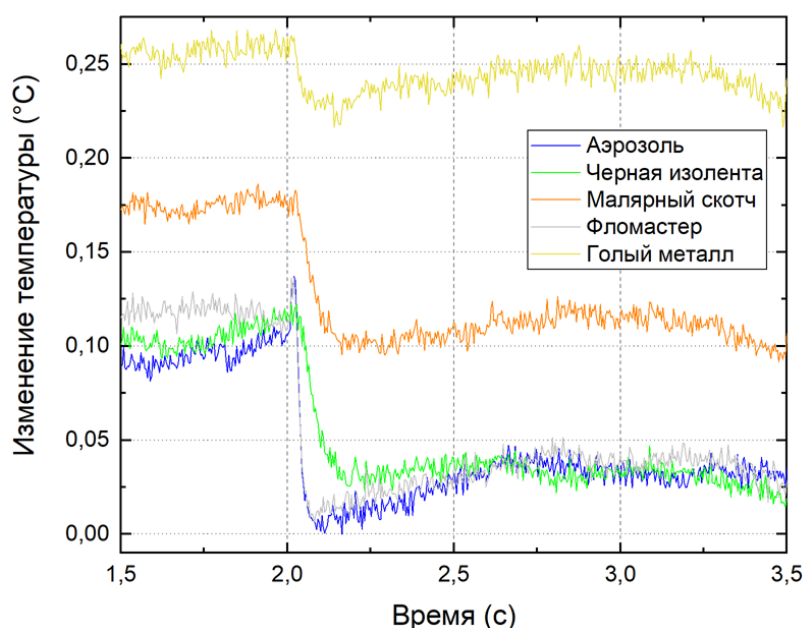


Рис. 9. Результат измерения температуры для выбранных областей опроса для числа Маха ударной волны  $M = 3.5$ .



Скачкообразное изменение температуры в канале отвечает сложным газодинамическим процессам, проходящим внутри ударной трубы. Идущая по камере низкого давления ударная волна нагревает и сжимает рабочий газ за собой, образуя так называемую “пробку”. Изменённые параметры газа за фронтом ударной волны, а именно: температура, давление, плотности, оцениваются по соотношениям Рэнкина – Гюгонио.

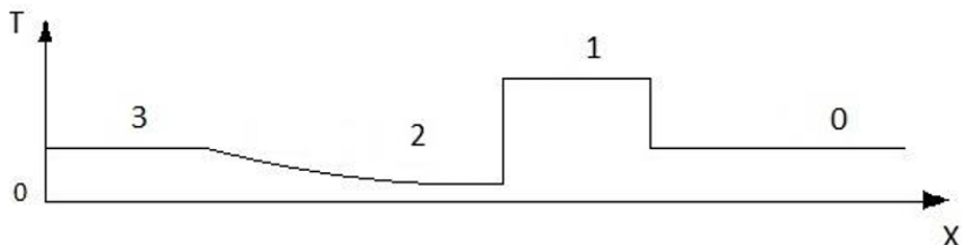


Рис. 10. Профиль температуры в потоке в канале.

На рис. 10 приведен профиль распределения температуры в канале. Нагретый и сжатый спутный поток, идущий за фронтом ударной волны, замыкается контактной поверхностью, которая разделяет рабочий и толкающий газы. Такое изменение теплового потока, наблюдаемое во всех областях опроса, обладает некоторой зависимостью от числа Маха. При анализе массивов данных было показано, что изменение температуры пропорционально увеличению числа Маха ударной волны, начиная с  $M = 2,2$  (рис. 11). Минимальное регистрируемое тепловизором время нарастания теплового потока из стенки за проходящей ударной волной – около 10 миллисекунд – для зоны опроса, покрытой черным аэрозолем. Исследовано также изменение теплового излучения с торцевой поверхности трубы, возникшего в результате двойного ударного сжатия при отражении ударной волны.

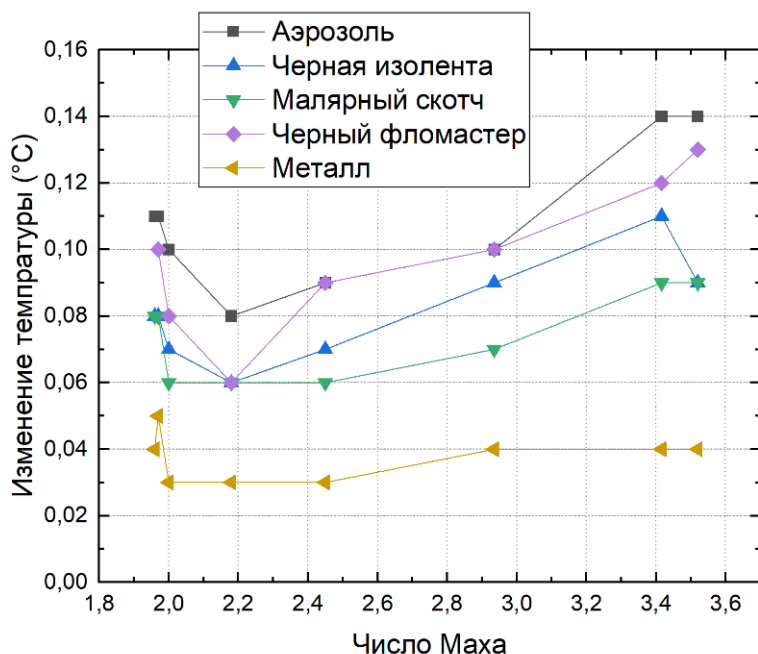


Рис. 11. График зависимости температуры от числа Маха.

## 4. Заключение

Появление нового класса регистрирующей инфракрасной техники и новых способов хранения визуальных данных привело к накоплению больших объемов цифровых экспериментальных данных. В данной работе на примере полученных на двух стендах -

теплофизическом и газодинамическом - массивов цифровых данных термографической визуализации высокоскоростных тепловых потоков представлены методы и результаты пост-обработки, анализа визуальных данных больших объемов.

На основе анализа эволюции динамических тепловых полей в миллисекундном диапазоне характерных времен были исследованы в широком диапазоне параметров эксперимента пульсации турбулентного гидродинамического течения импактной затопленной струи жидкости, возникающие при неизотермическом смешении вблизи стенки, прозрачной для ИК-излучения. Анализировались одновременно и пространственные, и временные характеристики изменяющихся тепловых полей, полученных при панорамной визуализации области импакта струи; для обработки массивов полученных данных применялись специальные программы.

Для газодинамического стенда было впервые зарегистрировано изменение теплового излучения с боковой и торцевой поверхностей канала при прохождении и отражении ударной волны. Измерения проведены для нескольких областей канала с различной теплопроводностью и излучательной способностью стенки. Показано, что минимальное регистрируемое тепловизором время нарастания теплового потока из наружной поверхности стенки при прохождении фронта ударной волны мимо точки опроса – около 10 миллисекунд. Выявлены количественные зависимости температурных и временных параметров термограмм от чисел Маха в диапазоне 1.9 - 3.5 (температуры газа за ударной волной) и материала покрытия. Газодинамическое течение в ударной трубе близко к одномерному; эволюция параметров исследовалась с максимальной частотой съемки, позволившей разрешить процессы, времена которых ограничены теплопроводностью стенок.

При исследованиях, сопровождающихся получением больших массивов данных панорамной визуализации, необходим дополнительный предварительный анализ гидродинамических течений с целью минимизации количества измерений и объемов получаемой информации:

- уточнение параметров области опроса (минимизировать область и время регистрации от начала и до окончания процесса, предварительно сделав оценку полезной области);
- оптимизация пространственного и временного разрешения регистрации (грубые оценки - по теореме Котельникова-Найквиста);
- обеспечение синхронизации аппаратуры с началом и окончанием процесса.

В данном исследовании проведение предварительного анализа и использование комплексов обработки массивов цифровых данных позволило получить новые результаты, минимизировать время эксперимента, ограничить расходование лимитированного ресурса цифрового оборудования.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-19-00672.

## Список литературы

1. Cai S., Liang J., Gao Q., Xu C. and Wei R., Particle Image Velocimetry Based on a Deep Learning Motion Estimator // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2019. P. 1-1. (10.1109/TIM.2019.2932649)
2. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. 2-е издание, доп. М. Издательский дом Спектр. 2009. С. 544.
3. Leontiev A.I., Kiselev N.A., Burtsev S.A., и др. Experimental investigation of heat transfer and drag on surfaces with spherical dimples // Exp. Therm. Fluid Sci. 79. 2016. P. 74–84. (doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.06.024)
4. Roux S., Fénot M., Lalizel L.-E. G., Dorigna Brizzi. E. Experimental investigation of the flow and heat transfer of an impinging jet under acoustic excitation // International Journal of Heat and Mass Transfer 54. 2011. P. 3277–3290.

5. Hofmann H. M., Kind M., Martin H. Measurements on steady state heat transfer and flow structure and new correlations for heat and mass transfer in submerged impinging jets // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 50. 2007. P. 3957–3965. (10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.01.023.)
6. Иваницкий Г. Р., Деев А. А., Хижняк Е. П. Структуры на поверхности воды, наблюдаемые с помощью инфракрасной техники // *Успехи физических наук*. Т. 175, N 11. 2005 С. 1207-1216.
7. Jessup A. T., Phadnis K. R. Measurement of the geometric and kinematic properties of microscale breaking waves from infrared imagery using a PIV algorithm // *Measurement Science and Technology*, 16(10). 2005. P. 1961–1969. (doi:10.1088/0957-0233/16/10/011)
8. Judd K.P., Smith G.B., Handler R.A., Sisodia A. The thermal signature of a low Reynolds number submerged turbulent jet impacting a free surface // *Physics of Fluids*, 20(11). 2008. 115102. (doi:10.1063/1.2981534)
9. Plaksina Y.Y., Pushtaev A.V., Vinnichenko N.A., Uvarov A.V. The effects of small contaminants on the formation of structures during rayleigh–benard–marangoni convection in a planar liquid layer // *Moscow University Physics Bulletin*. Vol. 73, no. 5. 2018. P. 513–519.
10. Chaugule, V., Narayanaswamy, R., Lucey, A., Narayan, V., Jewkes, J. Particle Image Velocimetry and Infrared Thermography of Turbulent Jet Impingement on an Oscillating Surface // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 98. 2018. P. 576-593. (doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.06.006)
11. Violato D., Ianiro A., Cardone G., Scarano F. Three-dimensional vortex dynamics and convective heat transfer // *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 37. 2012. P. 22–36. (DOI:10.1016/j.ijheatfluidflow.2012.06.003)
12. Dupont J., Mignota G., Paladino D., Prasser H. Mid wave infrared thermography of water films in condensing and evaporating environments// *Nuclear Engineering and Design*. 2018. N 336. P. 80-89. (doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.06.027)
13. Carlomagno G.M., Cardone G. Infrared thermography for convective heat transfer measurements // *Exp Fluids*. 49 2010. P. 1187–1218. (doi.org/10.1007/s00348-010-0912-2)
14. Знаменская И.А., Коротева Е.Ю., Новинская А.М., Сысоев Н.Н. Особенности спектров турбулентных пульсаций струйных затопленных течений воды // *ПЖТФ*. № 13. 2016. С. 51–57.
15. Коротева Е.Ю. Применение высокоскоростной термографической визуализации для валидации численных расчетов течений в пограничном слое жидкости. *Научная визуализация 10.2: 2018*. P. 112 – 121. (DOI: 10.26583/sv.10.2.09)
16. Nakamura H., Shiibara N., Yamada S. Quantitative measurement of spatio-temporal heat transfer to a turbulent water pipe flow // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2017. N 63. P. 46-55. (https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2016.09.016)
17. Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Небучинов А.С. Изучение влияния внешних периодических возмущений на интенсивность теплообмена в импактной струе // *Modern science collection of research papers*. № 1 (3). 2010. С. 101-109.
18. Nebuchinov A. S., Lozhkin Y. A., Bilsky A. V., Markovich D. M. Combination of PIV and PLIF methods to study convective heat transfer in an impinging jet // *Experimental Thermal and Fluid Science*. V. 80. 2017. P. 139–146. (https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.08.009)
19. Carlomagno G.M., Ianiro A. Thermo-fluid-dynamics of submerged jets impinging at short nozzle-to-plate distance. A review. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2014. V. 58. P. 15–35. (doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.06.010)
20. Фрик П.Г. Турбулентность: подходы и модели // *Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований*. 2003. С. 292.
21. Знаменская И.А., Коротева Е.Ю., Рязанов П.А., Шагиянова А.М. Исследования ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое воды методами высокоско-

- ростной термографии // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. 4 т., серия Механика жидкости и газа, том 2. С. 553-555.
22. Знаменская И.А., Коротеева Е.Ю., Глазырин Ф.Н. Методы цифрового анализа изображений жидких и газоплазменных потоков на основе кросс-корреляционной обработки // Научная визуализация 10.4: 2018. Р. 111 – 119. (DOI: 10.26583/sv.10.4.08)
  23. Carson L. Runninga, Thomas J. Julianoa, Joseph S. Jewellb, Matthew P. Borgb Hypersonic shock-wave/boundary-layer interactions on a cone/flare // Experimental Thermal and Fluid Science 109. 2019. P.109911.
  24. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений // 2013. С. 692.



# Analysis of large visualization datasets for thermographic studies in fluid dynamics

I.A. Znamenskaya<sup>1</sup>, A.M. Shagiyanova<sup>2</sup>, E.Yu. Koroteeva<sup>3</sup>, M.I. Muratov<sup>4</sup>, P.A. Ryazanov<sup>5</sup>

Lomonosov Moscow State University

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-6362-9496, [znamen@phys.msu.ru](mailto:znamen@phys.msu.ru)

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-2216-4503, [shagiyanova@physics.msu.ru](mailto:shagiyanova@physics.msu.ru)

<sup>3</sup> ORCID: 0000-0002-1705-5142, [koroteeva@physics.msu.ru](mailto:koroteeva@physics.msu.ru)

<sup>4</sup> ORCID: 0000-0002-6545-5829, [muratov583@gmail.com](mailto:muratov583@gmail.com)

<sup>5</sup> ORCID: 0000-0002-2003-6225, [pa.ryazanov@physics.msu.ru](mailto:pa.ryazanov@physics.msu.ru)

## **Abstract**

This paper reports on the visualization of non-stationary thermal fields for two experimental problems with different temporal and spatial scales using high-resolution infrared (IR) thermography. We study: 1. the near-wall region of the impinging non-isothermal liquid jet and 2. the heat fluxes from the shock-tube walls during the passage of the shock wave. These are the high-speed fluid dynamic processes, and their study involves obtaining and analyzing large amounts of visual data.

For the non-isothermal mixing of an impinging water jet, the flow is analyzed in the region near an IR-transparent wall. The thermograms of non-isothermal vortex flow in the near-wall region are presented. The energy spectra of temperature pulsations are computed for various regions of the wall-jet flow. In the gas-dynamic experiment, the thermal response of the shock tube wall to the shock wave propagation is studied. The infrared imaging of surfaces with different thermal conductivity and emissivity is conducted.

The approaches are discussed for optimizing the registration and analysis of large thermographic datasets.

**Keywords:** infrared thermography, post-processing, thermal radiation.

## **References**

1. Cai S., Liang J., Gao Q., Xu C. and Wei R., Particle Image Velocimetry Based on a Deep Learning Motion Estimator // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2019. P. 1-1. (10.1109/TIM.2019.2932649)
2. Vavilov V.P. Infrakrasnaja termografija i teplovoj kontrol' [Infrared thermography and thermal control]. 2nd ed. 2009. P. 544. [In Russian].
3. Leontiev A.I., Kiselev N.A., Burtsev S.A., и др. Experimental investigation of heat transfer and drag on surfaces with spherical dimples // Exp. Therm. Fluid Sci. 79. 2016. P. 74–84. (doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.06.024)
4. Roux S., Fénot M., Lalizel L.-E. G., Dorigna Brizzi. E. Experimental investigation of the flow and heat transfer of an impinging jet under acoustic excitation // International Journal of Heat and Mass Transfer 54. 2011. P. 3277–3290.
5. Hofmann H. M., Kind M., Martin H. Measurements on steady state heat transfer and flow structure and new correlations for heat and mass transfer in submerged impinging jets // International Journal of Heat and Mass Transfer. 50. 2007. P. 3957–3965. (10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.01.023.)
6. Ivanitskii G.R., Deev A.A., Khizhnyak E.P. Water surface structure studies using infrared techniques // Uspekhi Fizicheskikh Nauk, 175. N11. 2005. P. 1207 - 1216.

7. Jessup A. T., Phadnis K. R. Measurement of the geometric and kinematic properties of microscale breaking waves from infrared imagery using a PIV algorithm // *Measurement Science and Technology*, 16(10). 2005. P. 1961–1969. (doi:10.1088/0957-0233/16/10/011)
8. Judd K.P., Smith G.B., Handler R.A., Sisodia A. The thermal signature of a low Reynolds number submerged turbulent jet impacting a free surface // *Physics of Fluids*, 20(11). 2008. 115102. (doi:10.1063/1.2981534)
9. Plaksina Y.Y., Pushtaev A.V., Vinnichenko N.A., Uvarov A.V. The effects of small contaminants on the formation of structures during rayleigh–benard–marangoni convection in a planar liquid layer // *Moscow University Physics Bulletin*. Vol. 73, no. 5. 2018. P. 513–519.
10. Chaugule, V., Narayanaswamy, R., Lucey, A., Narayan, V., Jewkes, J. Particle Image Velocimetry and Infrared Thermography of Turbulent Jet Impingement on an Oscillating Surface // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 98. 2018. P. 576-593. (doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.06.006)
11. Violato D., Ianiro A., Cardone G., Scarano F. Three-dimensional vortex dynamics and convective heat transfer // *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 37. 2012. P. 22–36. (DOI:10.1016/j.ijheatfluidflow.2012.06.003)
12. Dupont J., Mignota G., Paladino D., Prasser H. Mid wave infrared thermography of water films in condensing and evaporating environments// *Nuclear Engineering and Design*. 2018. N 336. P. 80-89. (doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.06.027)
13. Carlomagno G.M., Cardone G. Infrared thermography for convective heat transfer measurements // *Exp Fluids*. 49 2010. P. 1187–1218. (doi.org/10.1007/s00348-010-0912-2)
14. Znamenskaya I.A., Koroteeva E.Yu., Novinskaya A.M., Sysoev N.N. Spectral peculiarities of turbulent pulsations of submerged water jets // *Technical Physics Letters*, 42. № 7. 2016. P. 686-688.
15. Koroteeva E.Yu. Application of high-speed thermographic visualization for validation of numerical simulations of liquid boundary layer flows. *Scientific Visualization* 10.2: 2018. P. 112 – 121. (DOI: 10.26583/sv.10.2.09)
16. Nakamura H., Shiibara N., Yamada S. Quantitative measurement of spatio-temporal heat transfer to a turbulent water pipe flow // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2017. N 63. P. 46-55. (https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2016.09.016)
17. Bilskiy, A.V., Lozhkin, Yu.A., Nebuchinov, A.S., The influence of the external periodical excitation on the heat transfer in the impinging jet // *Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technologies*, Iss. №1 (3), 2010. P. 101 - 109.
18. Nebuchinov A. S., Lozhkin Y. A., Bilsky A. V., Markovich D. M. Combination of PIV and PLIF methods to study convective heat transfer in an impinging jet // *Experimental Thermal and Fluid Science*. V. 80. 2017. P. 139–146. (https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.08.009)
19. Carlomagno G.M., Ianiro A. Thermo-fluid-dynamics of submerged jets impinging at short nozzle-to-plate distance. A review. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2014. V. 58. P. 15–35. (doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.06.010)
20. Frik P.G. *Turbulence: Approaches and Models* // Moscow – Izhevsk: Institute of Computer Science. 2003. P.292.
21. Znamenskaya I.A., Koroteeva E.Yu., Ryazanov P.A., Shagiyanova A.M. Investigations of a laminar-turbulent transition in a water boundary layer based on high-speed thermography // *XII Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics*. 4 vol. Series Fluid Dynamics. 2. 2019. P. 553-555. [In Russian].
22. Znamenskaya, I.A. Koroteeva E.Yu., Glazyrin F.M. Digital image analysis of liquid and gas-plasma flows based on cross-correlation algorithms. *Scientific Visualization* 10.4: 2018. P. 111 – 119. (DOI: 10.26583/sv.10.4.08)

23. Carson L. Runninga, Thomas J. Julianoa, Joseph S. Jewellb, Matthew P. Borgb Hypersonic shock-wave/boundary-layer interactions on a cone/flare // *Experimental Thermal and Fluid Science* 109. 2019. P.109911.
24. Zeldovich Ya.B., Raiser Yu.P. Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena // 2013. P. 692.