

Исследование воздействия мощного лазерного луча на плазменно-пылевые структуры на космической аппаратуре «Плазменный кристалл – 4»

Г.С. Мишура^{1,2}, А.Д. Усачев², А.В. Зобнин², А.М. Липаев², В.И. Молотков², О.Ф. Петров^{1,2},
М.Ю. Пустыльник³, М.А. Финк³, В. Носенко³, Х.М. Томас³

¹Московский физико-технический институт (государственный университет)

²Объединённый институт высоких температур РАН

³Лаборатория по исследованию комплексной плазмы, Германское космическое агентство, Германия

Введение

Пылевая плазма представляет собой ионизированный газ, содержащий заряженные частицы конденсированного вещества. Попадая в плазму, пылевые частицы приобретают отрицательный электрический заряд порядка 10^3 заряда электрона. Вследствие этого, неидеальность плазменно-пылевой системы реализуется значительно легче, чем неидеальность ионно-электронной системы. Тем самым, оказывается возможным появление ближнего порядка и даже кристаллизации, а также возникает возможность исследования процессов, происходящих в плазме, на кинетическом уровне. Отличительными особенностями пылевой плазмы, делающими её привлекательным объектом изучения и эффективным инструментом в исследовании фундаментальных свойств сильно неидеальной плазмы и кристаллов, являются простота получения, наблюдения и управления параметрами, малые времена релаксации и отклика на внешние возмущения. Лабораторная пылевая плазма является хорошей экспериментальной моделью для изучения различных транспортных процессов в диссипативных системах взаимодействующих частиц, которые представляют широкий интерес как в области физики неидеальной плазмы, так и в других областях естественных наук.

Структурные и динамические свойства плазменно-пылевых структур определяются совокупностью всех сил, действующих на пылевые частицы. Такими силами являются сила тяжести, электрическая сила, сила трения (увлечения нейтралами), термофоретическая сила и сила ионного увлечения. Совокупность всех этих сил существенно влияет на конфигурацию пылевых структур в плазменных установках, инициирует образование пустот (войдов) в протяженных 3-х мерных облаках в условиях микрогравитации, влияет на дисперсию низкочастотных пыле-акустических волн и определяет транспортные свойства частиц в плазме. Так же этими силами определяются области зависания пыли в токамаках и установках для плазменного травления, образование цепочечных структур.

В настоящее время при исследовании пылевой плазмы используют монодисперсные сферические частицы с размерами в диапазоне от субмикронных до десятков микрон. Однако в условиях земного притяжения при наличии силы тяжести создание плазменно-пылевых структур с частицами размера более 10 мкм сильно затруднено, и в лабораторных исследованиях в основном используются микрочастицы с размерами от 1 до 10 мкм.

Летом 2015 года были проведены первые эксперименты на борту МКС на новой экспериментальной установке «Плазменный Кристалл – 4» (ПК-4). В отсутствие гравитации удаётся существенно уменьшить влияние электрических полей, которые необходимы в земных условиях для левитации пылевых частиц и вызываемой этими полями сильной анизотропии плазмы. Целью настоящей работы являлось исследование воздействия мощного лазерного излучения на протяженные плазменно-пылевые структуры в положительном столбе газового разряда постоянного тока и оценка величины вязкости пылевой подсистемы.

Некоторые силы, действующие на пылевые частицы, уже подробно изучены. Некоторые, такие как вязкое трение или сила ионного увлечения, требуют дополнительных исследований. В работах [1] и [2] оценивался коэффициент сдвиговой вязкости. В слое пылевых частиц,

парящих над электродом, возбуждался поток лучом лазера. Для плазменно-пылевой жидкости, как для вязкой несжимаемой жидкости, решалось уравнение Навье-Стокса в цилиндрических координатах, а затем коэффициент вязкости находился как параметр, при котором расчётный и экспериментальный профили скоростей максимально совпадают. Несмотря на внешнюю схожесть схем экспериментов в ПК-4 и названных выше работ предполагается, что в условиях микрогравитации возможно получение более точной оценки коэффициента вязкости, что, в свою очередь, позволит в будущем дать однозначный ответ на вопрос о природе «вязких» явлений в пылевой плазме. Обработка экспериментальных данных с орбиты в данной работе выполнена впервые, и представляет как научный, так и технический интерес.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка ПК-4 предназначена для всестороннего исследования пылевой газоразрядной плазмы в условиях микрогравитации [3]. Круг решаемых задач чрезвычайно широк. В данной работе исследовалось воздействие мощного лазерного луча на однородное протяженное плазменно-пылевое облако.

Рабочая область представляет собой симметричный стеклянный цилиндр размерами 30 мм x 200 мм. По краям трубки расположены 6 диспенсеров как газовых, так и механических, с пылевыми частицами различных размеров. В газовых диспенсерах частицы подхватываются потоком газа при открытии клапана и выносятся в область разряда постоянного тока, в механических – просыпаются сквозь сетку при вибрациях, вызываемых электромагнитом. Попав в область разряда постоянного тока частицы заряжаются, а затем переносятся в рабочую область радиочастотным разрядом. Оптическая манипуляция частицами в плазменно-пылевом облаке осуществляется диодным лазером с длиной волны 808 нм, мощностью до 20 Вт и шириной луча в области перетяжки 2 мм. Ход эксперимента фиксируется двумя камерами: обзорной и высокого разрешения с небольшим полем зрения. Первая позволяет следить за поведением пылевого облака по всей длине рабочей области, вторая – в небольшой центральной её части размерами 22.1 мм x 16.6 мм. Видеосъемка осуществлялась с временем экспозиции 28 мс, частотой 35 кадров в секунду с разрешением 1600x1200 пикселей, что соответствовало пространственному разрешению 13.8 мкм на пиксель. Для осуществления видеорегистрации пылевые частицы освещались узким маломощным лазерным ножом с длиной волны излучения 536 нм. Перед обеими камерами установлен светофильтр отсекающий область длин волн иницирующего лазера и пропускающий свет на длинах волн лазерного ножа, поэтому на выходных видео-файлах видны частицы только в узком осевом срезе облака.

Установка также оснащена устройством термической манипуляции частицами, датчиками температуры и давления, клапанами для напуска и откачки разных сортов газа (неона, аргона, аргон-кислородной смеси), механизмами для настройки положения лазеров, колебаний лазеров с определённой частотой для возбуждения волновых процессов в пылевом облаке, коллиматорными линзами и прочими устройствами для проведения ряда экспериментов по исследованию свойств пылевой плазмы.

В проведённом нами эксперименте использовались сферические частицы полимера диаметром 3.38 мкм. Плазмообразующий газ неон находился при давлении 38 Па. Измерялись скорости частиц в поперечном срезе облака при разных мощностях иницирующего лазера. Лазер работал в режиме 10 секунд + 5 секунд, в котором первый отрезок времени он был включён, разгоняя частицы до некоторой конечной постоянной скорости, второй промежуток времени – отключён, позволяя частицам вернуться к начальному состоянию.

Сила светового давления

Радиационная сила выражается формулой [4]:

$$F_{rad} = \gamma \frac{A}{c} I, \quad (1)$$

где c – скорость света, I – интенсивность лазера (плотность мощности), A – площадь сечения частицы, γ – коэффициент аккомодации, который в простейшем предположении равен 0 при

прохождении фотона сквозь частицу без потери импульса, 1 при поглощении фотона частицей и 2 при упругом отражении. Учитывая рассеяние фотонов на частице, например, по теории Ми, можно заменить комбинацию γA на некоторое эффективное транспортное сечение σ_{tr} . Кроме того при прямоугольном профиле лазерного луча разные части частицы могут иметь разные температуры вследствие различной падающей на них интенсивности, поэтому возникает дополнительная термофоретическая сила, выталкивающая частицы из лазерного луча.

В условиях микрогравитации отпадает необходимость в электрическом поле поддерживающем частицы в левитирующем состоянии, а значит, ослабляется и влияние факторов, связанных с наложением на плазму электрического поля. Фактически, динамика частиц в условиях микрогравитации при однородной температуре в рабочем объеме и на стенках трубки определяется радиационной силой и силой трения.

Описание эксперимента. Определение профиля скорости частиц в поперечном срезе пылевого облака.

На первом этапе эксперимента формировалось протяженное однородное плазменно-пылевое облако. Для этого в плазму инжестировались монодисперсные пластиковые сферические частицы диаметром 3.38 мкм. Инжестированные частицы транспортировались из зоны вброса до экспериментальной зоны в центре камеры с помощью постоянного электрического поля разряда постоянного тока. При достижении частицами экспериментальной зоны разряд переводился в режим переключения полярности с частотой 500 Гц. При этом облако пылевых частиц останавливалось в центре камеры. Характерный вид стационарного плазменно-пылевого облака приведен на рис. 1.

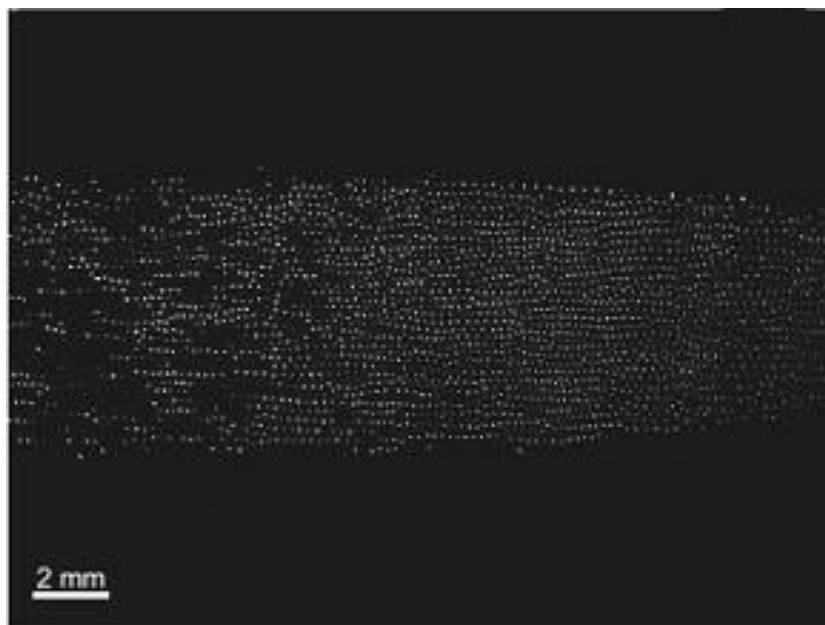


Рис. 1 – Стационарное плазменно-пылевое облако.

Его диаметр составлял 7 мм, длина – около 50 мм, а счетная концентрация пылевых частиц $n_d = 40 \text{ мм}^{-3}$. Схема воздействия лазерного излучения на плазменно-пылевое облако приведена на рис. 2 (устройство экспериментальной установки подробно описано в [3]). Лазерный луч генерировался диодным лазером JOLD-25-FCM-12 с максимальной выходной мощностью 20 Вт. Мощность лазера изменялась с помощью изменения величины тока накачки лазера. Эксперимент был проведен для токов накачки лазера 8А, 12А, 16А, 20А, 24А, 28А и 32А.

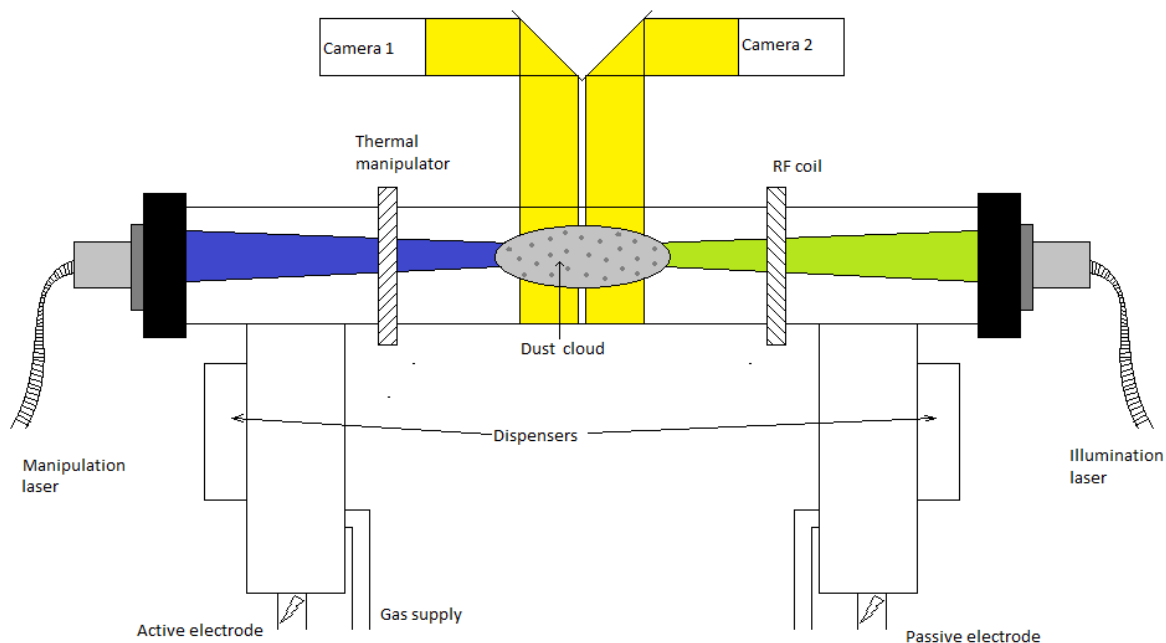


Рис.2 – Схема экспериментальной установки

Нами были посчитаны профили скорости для течений при первых трёх токах накачки для выявления тенденции изменения профилей скорости, зависимости максимальной скорости от мощности лазера, зависимости радиационной силы и силы трения от мощности. Мощность лазера была найдена из калибровочного графика, приведенного на рис. 3.

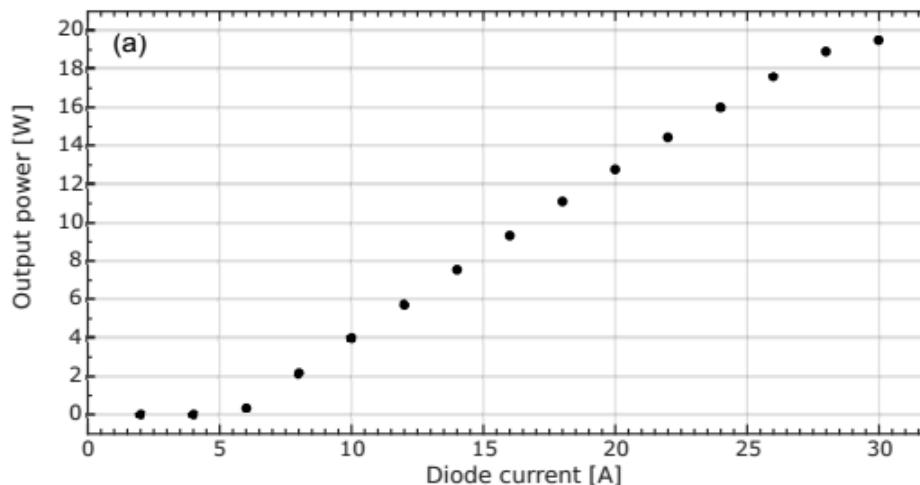


Рис. 3 - Зависимость интегральной мощности инициирующего диодного лазера от тока накачки.

Под воздействием лазерного луча наблюдалось локальное движение пылевой компоненты в пределах узкого канала диаметром около 2-х мм, что показано на рис.4. В условиях проведённого эксперимента время релаксации скорости частиц составляет десятые доли секунды, а, значит, при временах воздействия лазера много больших, чем время релаксации, в облаке будет наблюдаться стационарный поток, скорость которого определяется равенством сил радиационной и трения о нейтралы.

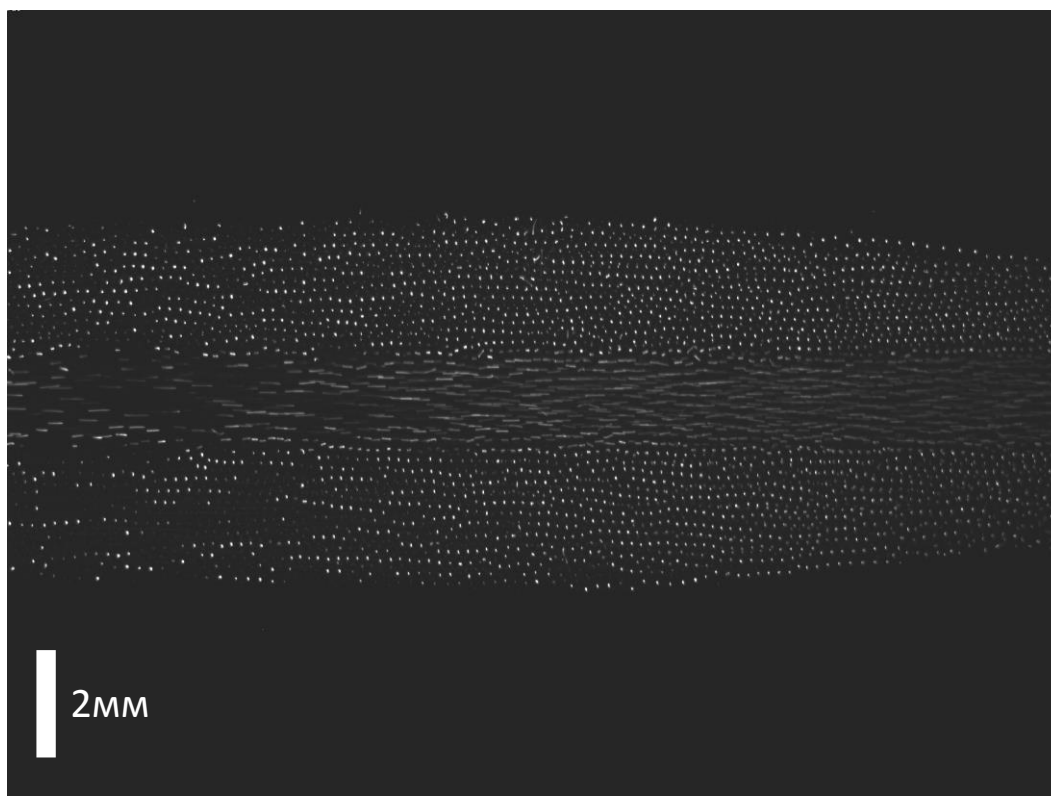


Рис. 4 - Изображение пылевого облака под действием лазерного луча мощностью 5.7 Вт.

Метод определения скорости

Скорость частиц была определена двумя методами: particle image velocimetry (PIV) и particle track velocimetry (PTV).

Суть метода PIV заключается в определении смещения частицы за несколько последовательных кадров. Видеозапись эксперимента была раскадрована, после чего на каждый кадр была наложена сетка с толщиной штриха 1 пиксель, ценой деления по вертикали 5 пикселей, по горизонтали 10 пикселей. Таким образом, определялись скорости частиц в тонких горизонтальных слоях по числу пересечённых ими вертикальных делений за некоторое количество кадров. Если частица в течение наблюдения уходила из области подсвечивающего лазера или выделенной горизонтальной области, то она не учитывалась. На каждой горизонтали определялись скорости не менее 8 частиц, находящихся в кадре как можно дольше и при этом не выходящих из центральной (по горизонтали) части облака, т.е. не ощущающих границы облака, где прямолинейное стационарное течение нарушается. Затем их скорости усреднялись и переводились из экранных масштабов в реальные (размер изображения 1200 пикс x 1600 пикс что соответствует 22.1мм x 16.6мм реальной области обзора камеры).

Метод PTV заключается в измерении длины трека частицы при известном времени экспозиции камеры. При возрастании скорости частица успевае за время съёмки одного кадра пройти всё большее и большее расстояние вследствие чего её изображение выглядит не как точка, а как размытый продолговатый след. Длина треков также измерялась в горизонтальных слоях изображения и затем переводилась к реальному масштабу. Профили скоростей, определённые методами PIV и PTV приведены на рис. 5.

Погрешность обоих методов обусловлена размытием границы изображения частицы. Разумно принять размер этого размытия равным 1 пикселю. Тогда погрешность определения скорости для частиц сместившихся на 10 пикселей или имеющих такую же длину трека будет составлять 10%. Как видно из графика, в пределах данной погрешности профили PIV и PTV практически идентичны. Однако, поскольку относительная погрешность обратно

пропорциональна измеряемой величине, то более целесообразно использовать метод PIV при малых скоростях, когда длина трека практически равна размеру частицы, но объекты не уходят из наблюдаемой области в течение значительного промежутка времени. При больших же скоростях частица может покинуть область наблюдения за пару кадров, но длина трека становится значительной, что позволяет использовать PTV на одном кадре без потери точности.

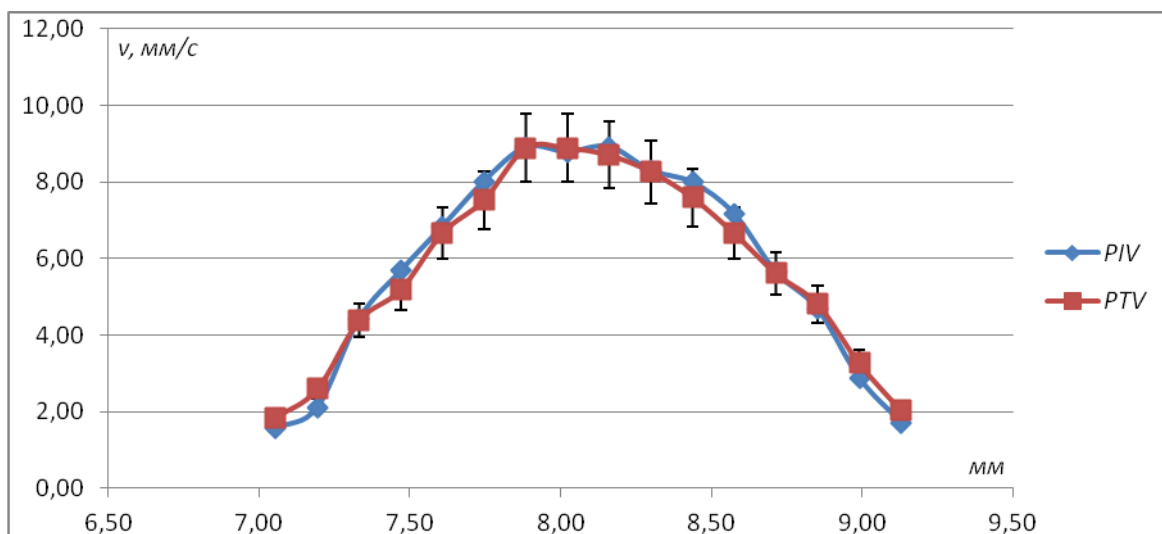


Рис. 5 - Профили скоростей построенные с помощью методов PIV и PTV для потока пылевых частиц под действием лазера мощности 5.7 Вт. Относительная погрешность равна 10%.

Для тока накачки 8А были проведены расчёты скоростей частиц методом PIV для первой трети промежутка времени работы лазера и последней трети. Результаты представлены на рис.6.

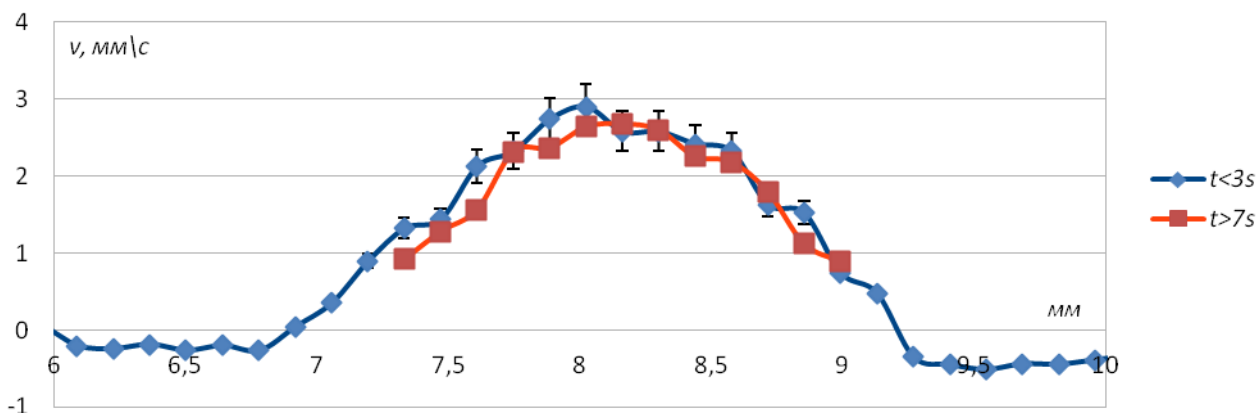


Рис. 6. Профили скорости потока пылевых частиц под действием лазера мощностью 2.2 Вт в начальный (синий) и конечный (красный) промежуток действия лазера.

Рис. 6 показывает, что в пределах 10% погрешности графики для начального и конечного этапа работы лазера совпадают. Это означает, что из-за малого времени релаксации частицы достигают своей конечной скорости практически сразу после начала работы лазера.

На рис. 7 изображены профили скоростей частиц при разных токах накачки лазера. Профили для 8 А и 12 А были построены методом PIV, для 16 А скорости частиц на периферии определены методом PIV, а в области действия лазера – PTV.

Рис. 8 отражает линейную зависимость максимальной скорости частиц в центре потока от мощности лазерного излучения. Как видно из графика, при отсутствии излучения скорость

частиц не обращается в нуль, а равна некоторому малому значению. Предполагается, что это происходит из-за дрейфовой скорости всего облака в направлении противоположном направлению потока. Это подтверждается наличием отрицательных значений скорости в профиле на рис. 7.

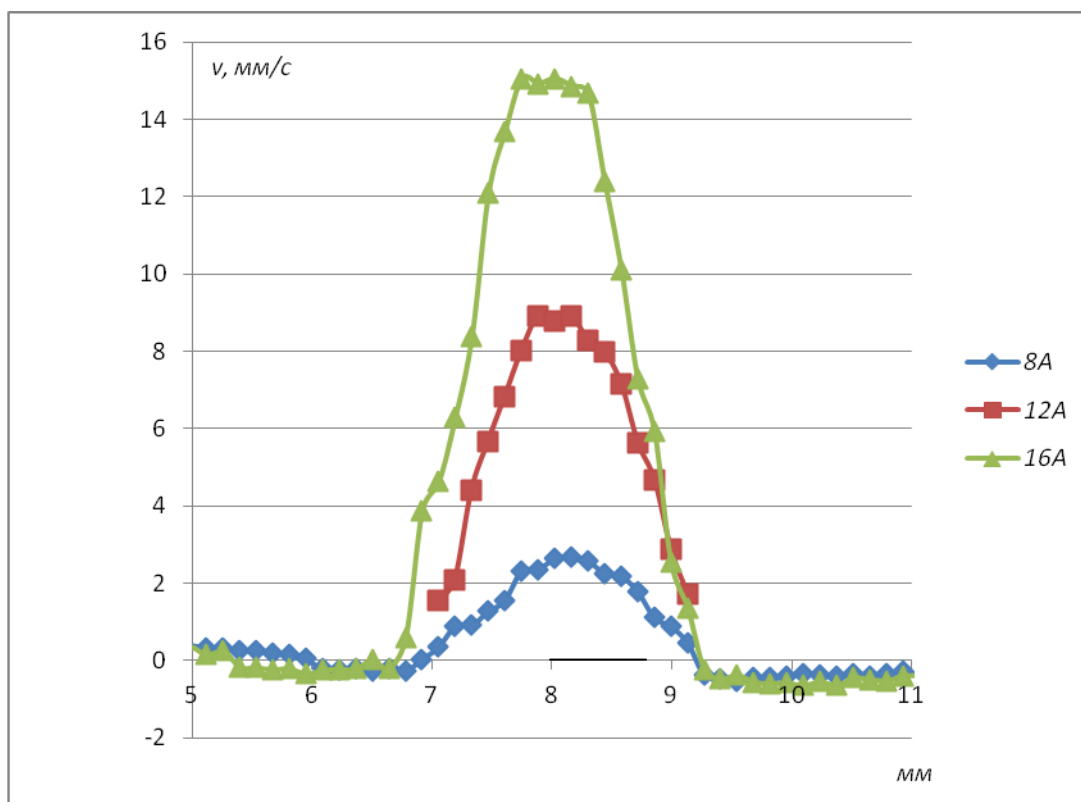


Рис. 7. Профили скоростей частиц в поперечном срезе пылевого облака для разных токов накачки лазера (мощностей).

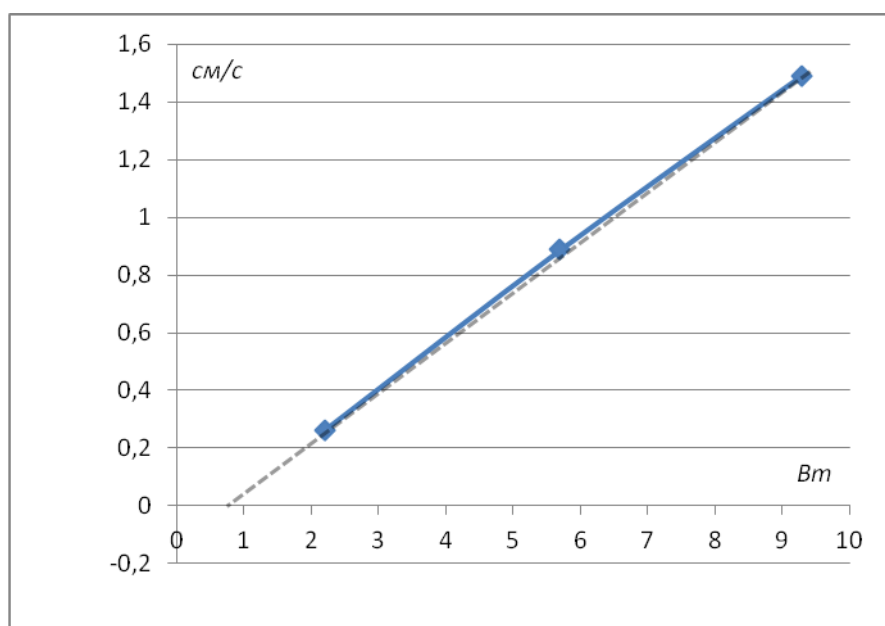


Рис. 8. Зависимость максимальной скорости потока пылевых частиц в области действия лазерного луча от мощности светового давления.

Оценка величины вязкости пылевой подсистемы и обсуждение результатов

Оценим влияние вязкости пылевой подсистемы на профиль наблюдаемого течения пылевых частиц. Уравнение стационарного движения пылевой компоненты под действием объемной силы давления оптического излучения лазера, трения о неподвижный нейтральный газ и собственной вязкости пылевой компоненты имеет вид:

$$F_L n_d - \kappa n_d u + \eta_d \Delta u = 0, \quad (2)$$

где F_L - сила давления, действующая на одну частицу, $\kappa = \frac{8\sqrt{2}\pi}{3v_t} a^2 P \left(1 + \frac{\pi}{8}\right)$ - коэффициент сопротивления движению из-за трения о нейтральный газ, η_d - вязкость пылевой подсистемы. В аксиально-симметричной задаче

$$\Delta u = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (3)$$

Интерпретация полученных в настоящей работе результатов значительно осложняется отсутствием данных по профилю лазерного луча в экспериментальной зоне. Оценим влияние вязкости пылевой подсистемы для случая идеального прямоугольного профиля лазерного луча, в котором сила светового давления обращается в нуль на некотором расстоянии от оси луча. В этом случае, вне луча профиль скорости является решением уравнения

$$\frac{\eta_d}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \kappa n_d u = 0 \quad (4)$$

Решение этого уравнения, убывающее на бесконечности, имеет вид $u = CK_0(\lambda r)$, где C - константа, $\lambda = \left(\frac{\kappa n_d}{\eta_d} \right)^{1/2}$, а K_0 - функция Макдональда. Функция Макдональда имеет ниспадающий вид с пространственным масштабом $1/\lambda$. Порядок величины вязкости однокомпонентной плазмы определяется выражением [5]

$$\eta_0 = m_d n_d \omega_p \left(3 / (4\pi n_d) \right)^{2/3}, \quad (5)$$

где $\omega_p = |Q| \sqrt{n_d / (\varepsilon_0 m_d)}$ - плазменная частота (Q - заряд пылевой частицы, m_d - масса частицы, ε_0 - диэлектрическая постоянная). В условиях данного эксперимента заряды частиц диаметром 3.4 мкм составляли около 10^{-15} Кл. Соответственно, $1/\lambda = 0.1$ мм. В то же время наблюдаемое размытие профиля скоростей составляет не менее 0.5 мм. Отсюда можно сделать вывод, что наблюдаемый профиль скоростей пылевых частиц близок к профилю интенсивности лазерного луча, а влияние вязкости пылевой подсистемы на измеренный профиль не велико. Для определения вязкости пылевой подсистемы в будущих экспериментах необходимы точные данные по профилю лазерного луча, повышение точности измерения профиля скоростей пылевых частиц и снижение давления буферного газа.

Заключение

В данной работе проведено экспериментальное исследование воздействия мощного лазерного луча на сильно неидеальное однородное протяженное плазменно-пылевое облако в условиях невесомости. Показано, что под действием лазерного излучения формируется локальное направленное движение пылевых частиц в узком цилиндрическом канале. Для получения

количественных данных о движении пылевых частиц были разработаны и реализованы 2 метода измерения профилей скоростей пылевых частиц. Проведен анализ измеренного профиля течения плазменно-пылевой жидкости. Показано, что профиль течения пылевой подсистемы определятся главным образом профилем интенсивности излучения в лазерном луче. Относительное влияние вязкости пылевой подсистемы на динамику плазменно-пылевого течения в данных условиях незначительно. Предложены рекомендации об изменении условий эксперимента для измерения величины вязкости пылевой подсистемы в будущих экспериментах.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Теплофизика высоких плотностей энергии».

Литература

1. *Н.А. Ворона, А.В. Гавриков, А.С. Иванов, О.Ф. Петров*, ЖЭТФ, 2007, т.132, вып.4(10)
2. *A. Gavrikov, I. Shakhova, A. Ivanov, O. Petrov*, Physics Letters, 2005, V. 336
3. *M. Y. Pustynnik, M. A Fink., Nosenko V., et al* Plasmakristall-4: New complex (dusty) plasma laboratory on board the International Space Station // Rev. Sci. Inst. 2016. V. 87. P. 093505
4. *A. Melzer*, Plasma Sources Sci. Technol., 2001, 10
5. *Z. Donko, P. Hartmann*, Shear viscosity of strongly coupled Yukawa liquids. // Phys. Rev. E 78 (2008) 026408