

Моделирование дифракции микрочастиц загрязнения гидравлических жидкостей

Д.В. Корнилин^а, И.А. Кудрявцев^а, С.А. Дегтярев^а

^а Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

Аннотация

При построении современных датчиков для диагностики гидросистем возникает задача определения размеров, концентрации, формы микрочастиц загрязнения гидрожидкостей. Поскольку размеры частиц находятся в диапазоне от 0,5 до 200 мкм, а длина волны облучения около 800 нм, необходимо вносить определенные коррективы в размер частиц, определяемый с помощью датчика частиц, связанные с дифракцией. В данной работе рассматриваются результаты различных подходов к моделированию дифракции на основе использования программы BeamPROP и принципа Гюйгенса-Френеля. При этом основной акцент делается на извлечении информации о размерах частиц для условий физической модели автоматического счетчика частиц на основе матричного фотоприемника.

Ключевые слова: гидросистемы; автоматические счетчики частиц; моделирование; дифракция; частицы загрязнения; матричный фотоприемник

1. Введение

Одним из наиболее эффективных методов диагностики гидросистем является диагностика по параметрам частиц загрязнений гидрожидкости [1]. Существующие средства определения гранулометрического состава частиц загрязнения - автоматические счетчики частиц (АСЧ), - строятся на основе фотоэлектрического принципа. То есть светодиод или лазер являются источником излучения, а приемником - фотодиод. О размере частиц при этом судят по амплитуде импульса с выхода фотоэлектрического преобразователя [1]. Недостатком АСЧ на основе фотодиода является низкая чувствительность, порядка 5 мкм, связанная с большой площадью его апертуры. Согласно ГОСТ 17216-2001, минимальный размер частиц загрязнения, подлежащий контролю 0,5 мкм, что соответствует необходимости контроля современных гидросистем повышенного давления и малых габаритов. Другим недостатком использования фотодиода является его низкая разрешающая способность [2], также связанная с его большой площадью, в результате несколько частиц в измерительном объеме засчитываются как одна. Возможным решением указанных проблем является использование матричного фотоприемника или видеокамеры. При этом использование видеокамер существенно ограничивает точность измерения параметров загрязнения, так как их применение возможно только в лабораторных условиях для контроля отобранных проб гидрожидкости. Однако, процесс пробоотбора вносит существенные искажения в процесс измерения, особенно в случае контроля ультрачистых гидросистем, например аэрокосмического назначения [1]. Невозможность использования видеокамер с объективами и другой прецизионной оптикой в датчиках встроенного контроля гидросистем [1] из-за тяжелых условий эксплуатации (вибрации, давление) приводит к необходимости обработки сигнала непосредственно с матричного фотоприемника, используемого как прямая замена фотодиода.

Математическая модель формирования изображения от частицы для датчика на основе матричного фотоприемника для частиц размером более 10 мкм приведена в [3]. Для частиц размером менее 10 мкм, при облучении на длине волны порядка 800 нм необходимо учитывать дифракционные эффекты. Ключевой характеристикой двумерного сигнала на поверхности матрицы является размер области тени от частицы, поскольку он определяет область, по которой в дальнейшем вычисляется размер частиц. Также размер области определяет чувствительность датчика, т.к. чем на большее количество пикселей размывается тень, тем меньше чувствительность. Размер частиц определяется фотометрическим методом как указано в [4], то есть определяется сигнал без частицы и с частицей и относительная разница дает величину светового потока, поглощаемую частицей. По величине этого светового потока возможно определения размера частицы. В данной работе исследуется влияние дифракции на размер формируемого пятна (тени) от частицы на поверхности матрицы. В качестве изменяемых параметров служат расстояние между частицей и матрицей, которое может изменяться в пределах от 0 до 1 мм, а также размер частицы.

Для моделирования возможно использование программы BeamPROP, поскольку условия ее использования соответствуют физической модели датчика. Однако, для получения результатов по всему диапазону размеров частиц от 0,5 до 10 мкм с шагом 1 мкм, а также по всему диапазону расстояний от 0 до 1 мм с шагом 0,1 мм; необходимо затратить существенное время. В работе показано, что используя принцип Гюйгенса-Френеля, возможно получение аналогичных результатов при существенно меньших временных затратах без существенной потери точности. На начальном этапе в качестве модели излучателя используется плоская волна.

2. Методы исследования

В качестве опорного метода использовалась программа BeamPROP, основанная на Beam propagation method. В качестве основной программы использовалась программа, написанная авторами. Вид окна программы приведен на рис. 1.

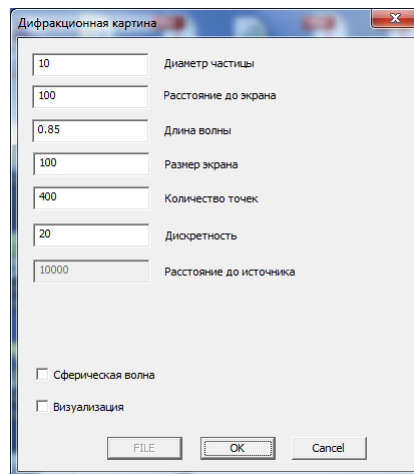


Рис. 1. Вид окна программы на основе принципа Гюйгенса-Френеля.

В основу работы программы положены следующие принципы.

1. Рассчитываем исходя из принципа, что вторичный фронт волны представляет собой источники сферической волны.
$$U(r) = A/r \cos(2\pi/\lambda r),$$
где r – расстояние от источника до точки наблюдения;
2. В случае плоской волны считаем, что все вторичные источники излучают синфазно, в случае сферической волны фазы рассчитываются исходя их расстояния до первичного источника;
3. Расчет амплитуды в точке наблюдения ведем из предположения, что сдвиг источника (или экрана на $\lambda/6$ (при условии, что расстояние до экрана много больше длины волны) не приводит к значительному изменению интенсивности. Тогда рассчитывая два текущих значения сигнала в точке наблюдения при указанном сдвиге, находим амплитуду, исходя из того, что наблюдается два значения сигнала с разностью фаз в $\pi/3$;
4. Результаты нормированы к амплитуде без наличия диска;
5. Дифракционная картина, рассчитывается путем вычитания волн, излучаемых светящим диском из значений в точке наблюдения, создаваемых падающей волной без учета препятствия;
6. При расчете учитывается, что в точке наблюдения падающая волна вносит свой вклад с учетом косинуса угла падения;
7. Параметры при расчете: длина волны, расстояние от диска до экрана, размер стороны квадратного экрана, число точек наблюдения вдоль радиуса пятна на экране, дискретность разбиения диска на элементарные площадки по радиусу. При выборе сферической волны добавляется расстояние от источника излучения до диска;
8. Выходной параметр сигнал в условных единицах имитирует отклик фотоприемника, путем вычисления разности в потоке излучения без препятствия и при его наличии.

3. Результаты и их оценка

На рис. 2 показаны результаты моделирования с использованием программы BeamPROP и программы на основе принципа Гюйгенса-Френеля для частицы радиусом 5 мкм, размер экрана 100x100 мкм, длина волны излучения 850 нм.

Анализируя и сопоставляя результаты работы обеих программ можно сделать следующие выводы:

- 1) Дифракционные картины как результаты работы обеих программ совпадают с точностью до шкалы яркости
- 2) С увеличением расстояния между матрицей и частицей увеличивается и область, для которой необходимо проводить вычисления
- 3) На рис.2 в) можно видеть результат отражения от условных стенок границ области, в то время как для программы на основе принципа Гюйгенса-Френеля они отсутствуют
- 4) Относительно времени вычислений, для BeamPROP она составляла около 2 часов, в то время как для другой – не более 10 сек.

На рис. 3 показана дифракционная картина, полученная с помощью матричного фотоприемника MT9V032C12STM от частицы диаметром 13 мкм при освещении ее лазерным диодом SV5637. На картине виден неравномерный фон,

обусловленный особенностями работы VCSEL диодов. Следует отметить некоторое совпадение картин на рис. 3 и рис. 2 для случая расстояния 0,5 мм.

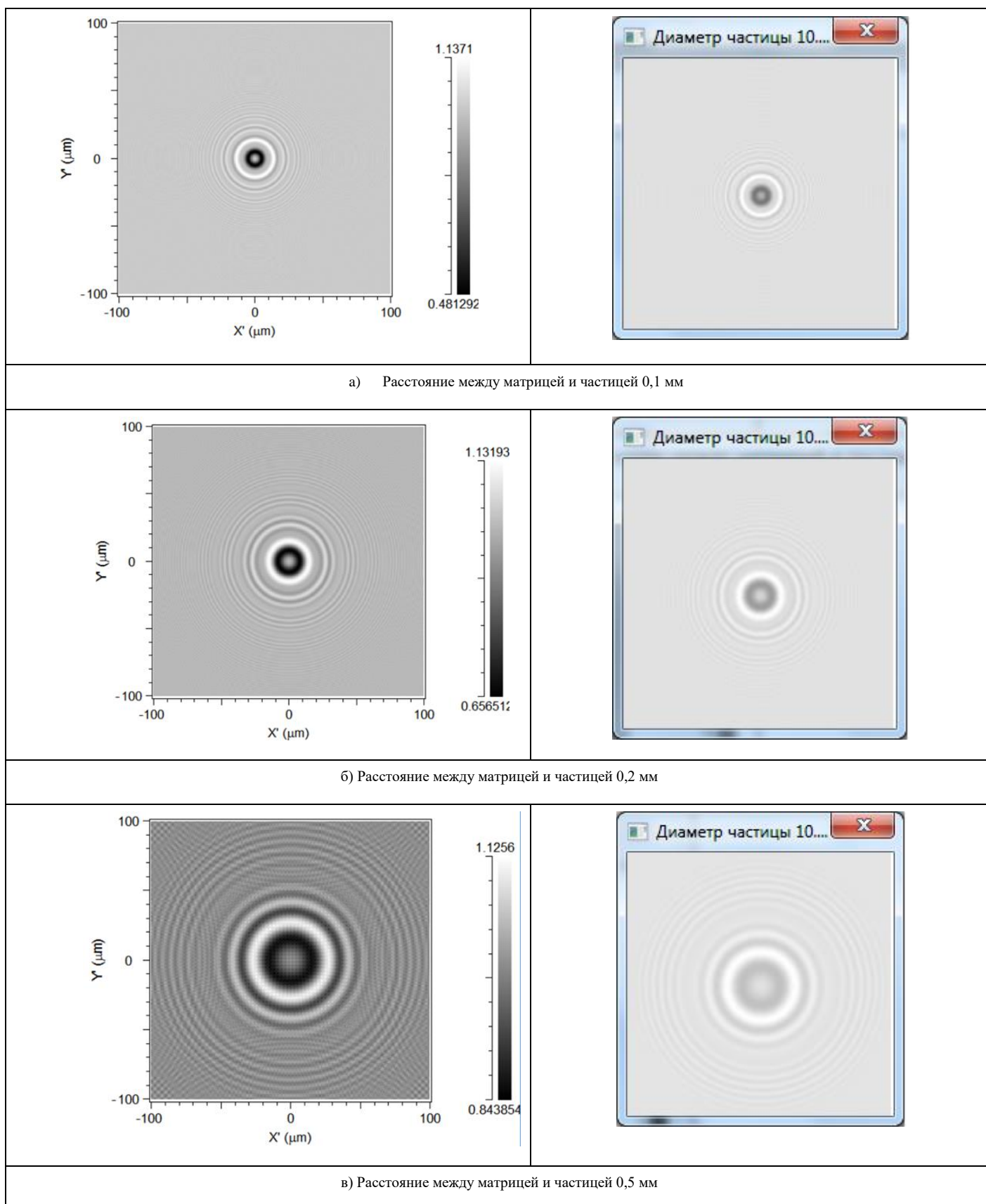


Рис. 2. Результаты моделирования с использованием программ BeamPROP (слева) и программы на основе принципа Гюйенса-Френеля (справа).

С точки зрения построения матричного фотоприемника интересно также получение зависимости сигнала от расстояния, от размера частицы, а также от выбранной области вычислений, то есть размера экрана.

Следует отметить также, что при размере пикселя матрицы порядка 6 мкм, размер области от частицы диаметром 10 мкм в $100 \times 100 \text{ мкм}^2$ довольно велик и может ограничивать предельную измеряемую концентрацию. Также велик

разброс размера пятна дифракционной картины: если на расстоянии 0,1 мм он составляет 25 мкм, то на расстоянии 0,5 мм он уже порядка 200 мкм. Учитывая тот факт, что расстояние между частицей и матрицей (координата прохождения частицей измерительного объема) является случайной величиной, анализ дифракционных картин является довольно сложной задачей.

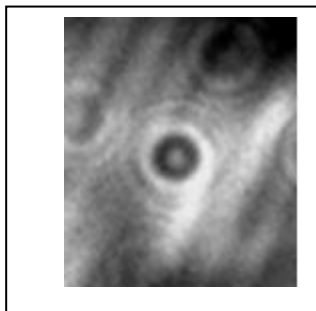


Рис. 3. Дифракционная картина от частицы диаметром 13 мкм, полученная в результате эксперимента.

В продолжение, необходимо также отметить ограничение при моделировании плоской волной, что не совсем соответствует реальному случаю использования лазерного диода и не соответствует использованию светодиода. При моделировании светодиода следует также учитывать относительно широкий спектр излучения, а также пространственную и временную когерентности, что будет сделано в дальнейшем.

4. Заключение

Разработана и протестирована программа моделирования дифракции микрочастиц загрязнения гидрожидкости, работающая на основе принципа Гюйгенса-Френеля. Получены дифракционные картины от микрочастиц в зависимости от расстояния между частицей и матричным фотоприемником. Анализ дифракционных картин показывает достоверность получаемых результатов, а также позволяет разрабатывать подходы к извлечению информации из дифракционных картин.

Литература

- [1] Логвинов, Л.М. Техническая диагностика жидкостных систем технологического оборудования по параметрам рабочей жидкости/ Л.М. Логвинов. – Москва: ЦНТИ “Поиск”, 1992. – 91 с.
- [2] Кудрявцев, И.А. Повышение разрешающей способности и чувствительности фотоэлектрических преобразователей встроенного контроля дисперсной фазы для систем управления: дис. на соиск. учен. ст. канд. тех. наук./ Кудрявцев Илья Александрович. - Самара, 1999. –140 с.
- [3] Kornilin, D.V. A mathematical model of the inline CMOS matrix sensor for investigation of particles in hydraulic liquids/D.V. Kornilin, I.A. Kudryavtsev// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.- 2016. - Volume 153, Issue 1, Article number 012007, DOI: 10.1088/1757-899X/153/1/012007.
- [4] Kornilin, D.V. Determination of particle sizes in hydraulic liquids based on image- and subpixel processing/D.V. Kornilin, I.A. Kudryavtsev, A.J. McMillan, A. Osanlou, I. Ratcliffe//Proc. SPIE. – 2016.- 9971, Applications of Digital Image Processing XXXIX, 99712Q. doi: 10.1117/12.2237349.