

*Двенадцатая Международная научно-техническая конференция  
«Оптические методы исследования потоков»  
Москва, 25 — 28 июня 2013 г.*

УДК 535.8

Д.В. Воробьев, А.Н. Куликов, П.Г. Макаров, В.В. Стреченюк  
руководитель А.С. Дмитриев, д.т.н., проф.

*Национальный Исследовательский Университет «Московский энергетический институт»,  
Россия*

*111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: [5k3t4@rambler.ru](mailto:5k3t4@rambler.ru)*

## **ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ РАСТВОРА НАНОЧАСТИЦ $Fe_2O_3$**

### **АННОТАЦИЯ**

Данная работа посвящена оптическим методам исследования динамики движения раствора наночастиц  $Fe_2O_3$ . Для растворов с различной концентрацией наночастиц были изучены процессы испарения, движения по наклонной подложке и отрыва капли в динамике. В данной работе представляется для обсуждения 3 разных раствора наночастиц с различными концентрациями на двух различных поверхностях (стекло и кварц).

**НАНОЧАСТИЦЫ  $Fe_2O_3$ , ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, ИСПАРЕНИЕ, ДВИЖЕНИЕ КАПЛИ,  
ДВИЖЕНИЕ РАСТВОРА НАНОЧАСТИЦ, ОТРЫВ КАПЛИ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Большой интерес представляет изучение оптических свойств процессов испарения жидкостей разных составов с различных поверхностей и динамика движения капель и струй жидкостей. Динамические процессы в жидкостях сильно влияют на их оптические свойства. Цель настоящей работы заключалась в исследовании оптических свойств жидкостей с включениями наночастиц в трех разных условиях: испарение капель с разных подложек, течение жидкости по подложке, рост и отрыв капли.

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

#### **Испарение капли**

Исходный раствор наночастиц  $Fe_2O_3$  (диаметр н/ч 3нм – 5 нм) в воде, аммиаке и растворе NaCl. Концентрация наночастиц  $Fe_2O_3$  составляла 40 мг/л и разбавлялась 0.9% раствором NaCl в воде. Таким образом, готовились образцы с концентрацией 3 мг/л, 1 мг/л, 0.5 мг/л, 0.1 мг/л, 0.05 мг/л, 0.025 мг/л (рисунок 1). В данной работе мы представляем результаты измерений растворов только с концентрациями 3 мг/л и 0.5 мг/л.



Рис. 1. Растворы наночастиц  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  разной концентрации

Проводились две серии опытов на двух разных подложках: кварцевой и стеклянной.

Разные объемы – на кварце 10 мкл, на стекле 3 мкл. Осаждение капли на поверхность производилось электронным дозатором Thermo Scientific с точностью 0.2 мкл.

Схема эксперимента представлена на рисунке 2. Капля жидкости наносилась на поверхность подложки. Измерения спектра проходящего излучения проводились на установке для измерения угловых спектральных коэффициентов отражения и прохождения. Источником света являлись галогенная и дейтериевая лампы, излучение которых подводилось через оптоволокну и фокусировалось на объекте исследования. Диаметр светового пятна составлял 3 мм. Размер капли составлял 4-6 мм и варьировался в зависимости от смачиваемости подложки и объема жидкости.

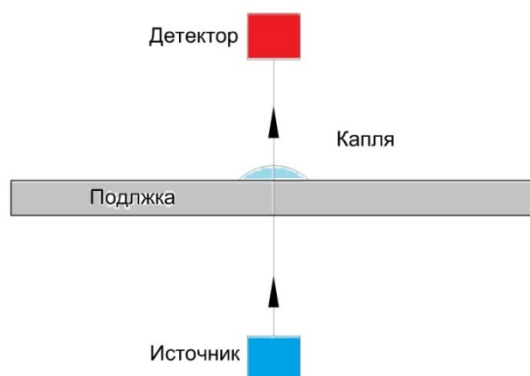


Рис. 2. Схема измерений

Детектором являлся спектрофотометр Avantes 2048 с ПЗС матрицей. Прошедший через каплю свет собирался линзой и по оптоволокну направлялся к спектрофотометру.

Процесс измерения спектра проводился от момента осаждения капли на подложку до испарения жидкости (отсутствие изменений в детектируемом спектре). Перед каждым осаждением снимался базовый спектр, который соответствовал спектру прошедшего через подложку света без капли.

Капля физиологического раствора объемом 3 мкл (1% раствора  $\text{NaCl}$  в воде) наносилась на поверхность покровного стекла. Диаметр капли около 4 мм.

В течение первых минут интенсивность излучения возрастала по сравнению с базовой (спектр без капли), так как капля выступала как собирающая линза (рисунок б). Далее интенсивность падала, проходя базовую линию приблизительно через 8-9 минут после

начала эксперимента. Последующее снижение интенсивности спектра обусловлено процессом выпадения в осадок соли NaCl в жидкости, связанного с пересыщением раствора.

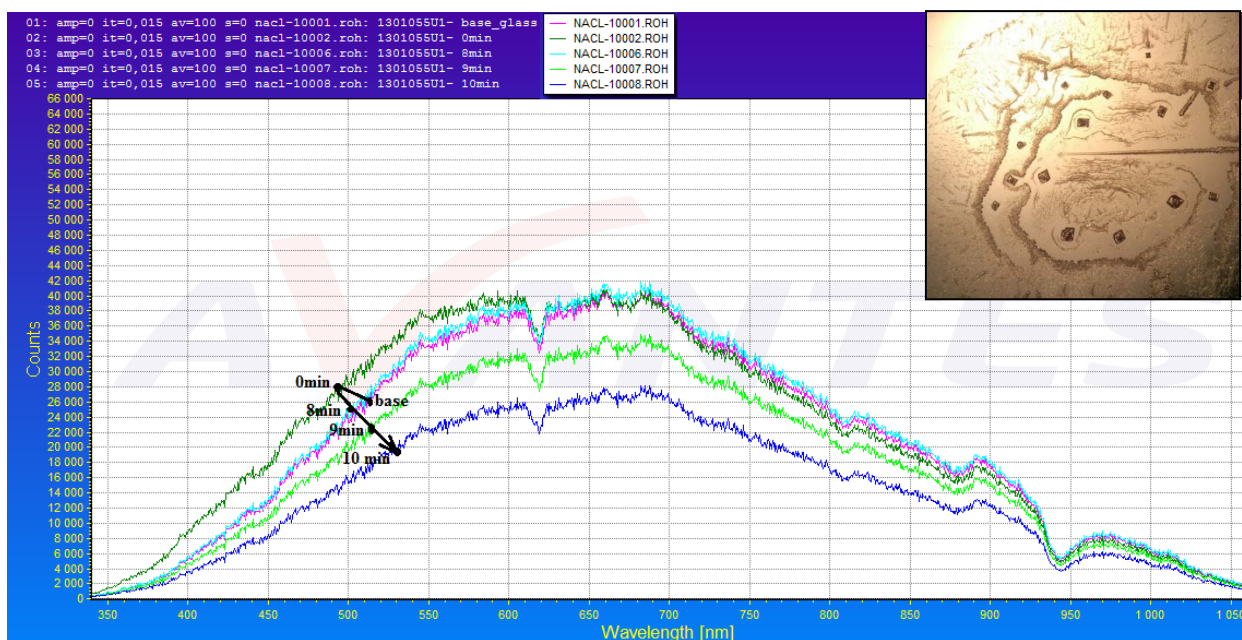


Рис. 3. Испарение 3 мкл капли физиологического раствора (1% раствора NaCl в воде) на стекле

Капля раствора наночастиц  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  с концентрацией 0.5 мг/л объемом 3 мкл наносилась на поверхность покровного стекла. Диаметр капли около 4 мм.

В ходе измерений спектра прошедшего излучения для капли с концентрацией наночастиц 0.5 мг/л (рисунок 4) динамика процесса испарения проходила так же, как и в случае раствора NaCl.

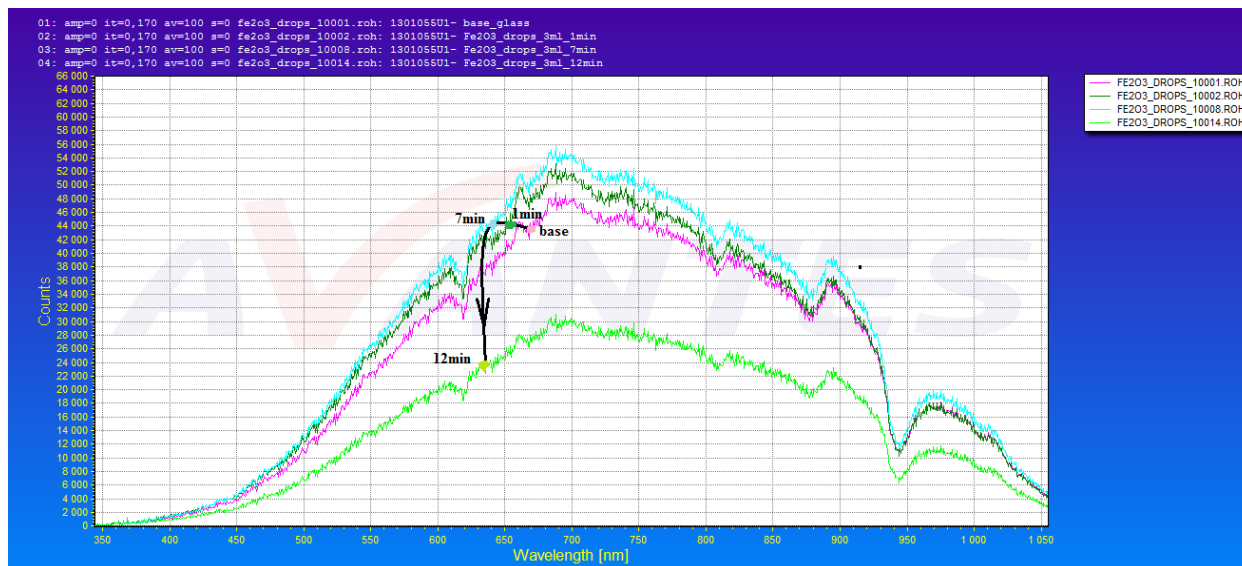


Рис. 4. Испарение 3 мкл капли раствора наночастиц  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (диаметр н/ч 3нм – 5 нм) в физиологическом растворе (1% раствора NaCl в воде) на стекле. Концентрация раствора наночастиц 0.5 мг/л

Для капли с концентрацией 3 мг/л (рисунок 5) динамика процесса испарения отличается от выше рассмотренных: конечный спектр, соответствующий двенадцатой минуте измерений, не опускается ниже базового спектра.

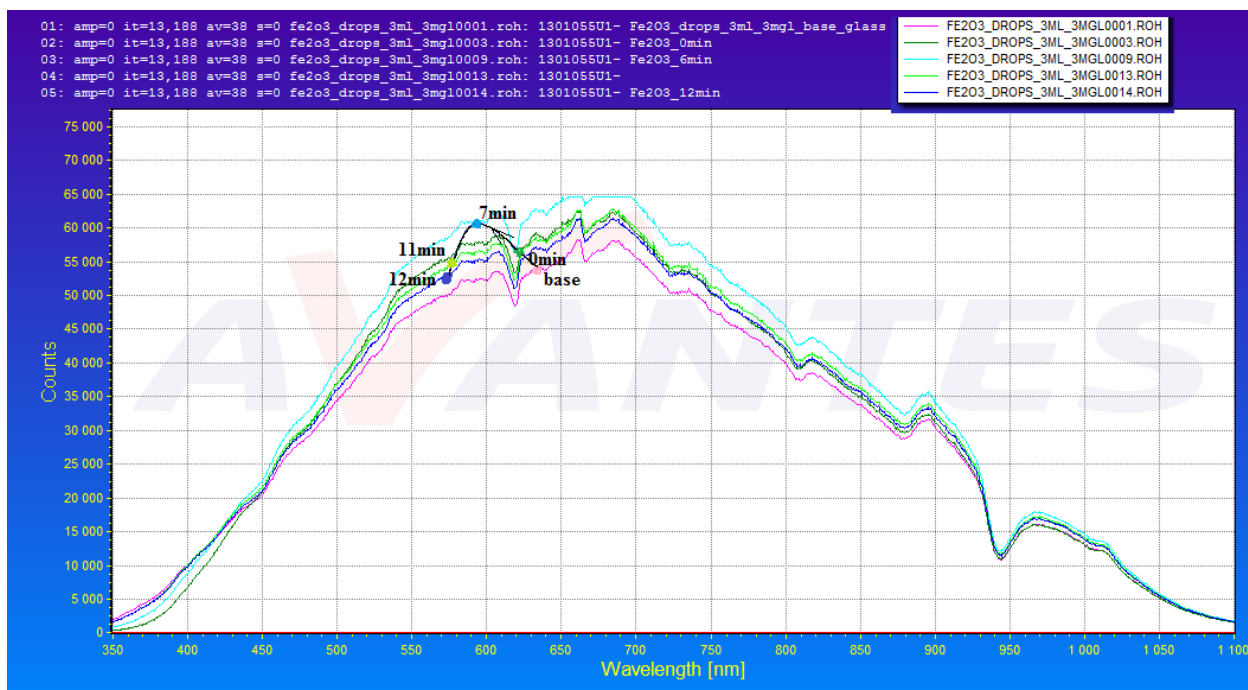


Рис. 5. Испарение 3 мкл капли раствора наночастиц Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (диаметр н/ч 3нм – 5 нм) в физиологическом растворе (1% раствора NaCl в воде) на стекле. Концентрация раствора наночастиц 3 мг/л

Капля физиологического раствора объемом 10 мкл (1% раствора NaCl в воде) наносилась на поверхность покровного стекла. Диаметр капли около 5 мм.

Сразу после осаждения капли интенсивность спектра снизилась (рисунок 6). По мере испарения капли график интенсивности спектра рос и достиг своего максимума через 23 минуты, когда капля полностью испарилась. Конечный спектр совпал с первоначальным.

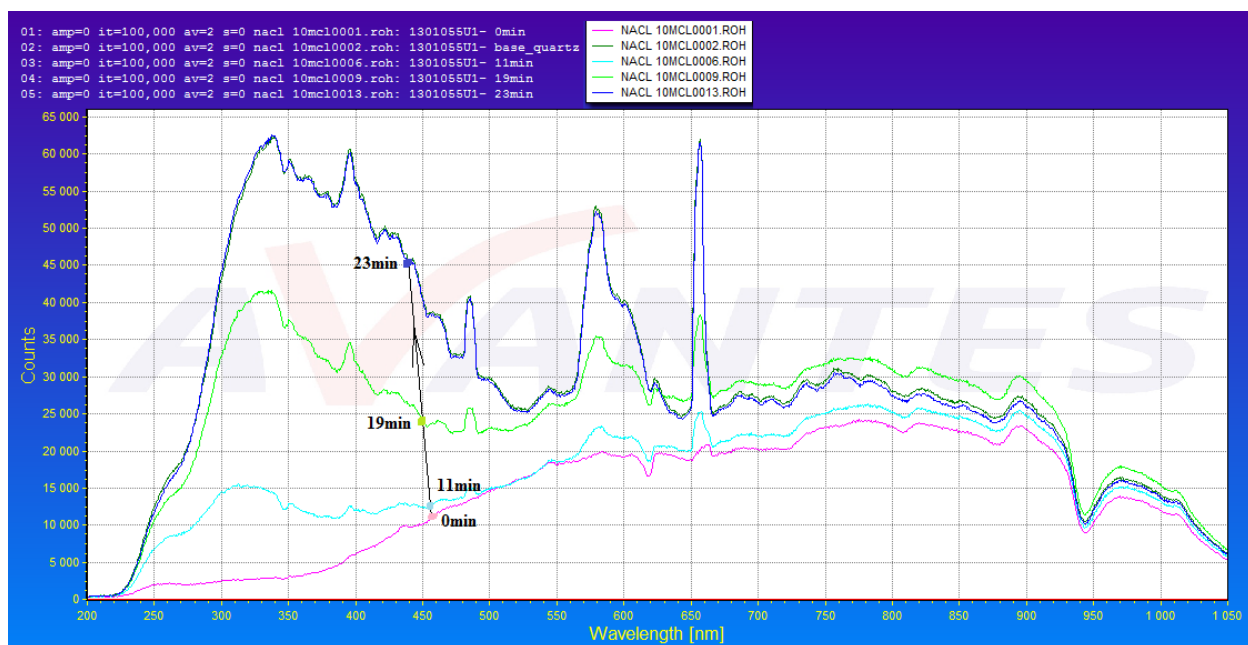


Рис. 6. Испарение 10 мкл капли физиологического раствора (1% раствора NaCl в воде) на кварце

Как только произошло осаждение раствора наночастиц концентрацией 0.5 мг/л (рисунок 7), было зафиксировано сильнейшее падение интенсивности. Далее интенсивность возрастала, достигнув максимума за время около 30-35 минут. Затем интенсивность

прошедшего спектра снижалась за 2-3 минуты, и спектр более не менялся. Стационарная картина возникала после 33-39 минут после начала эксперимента.

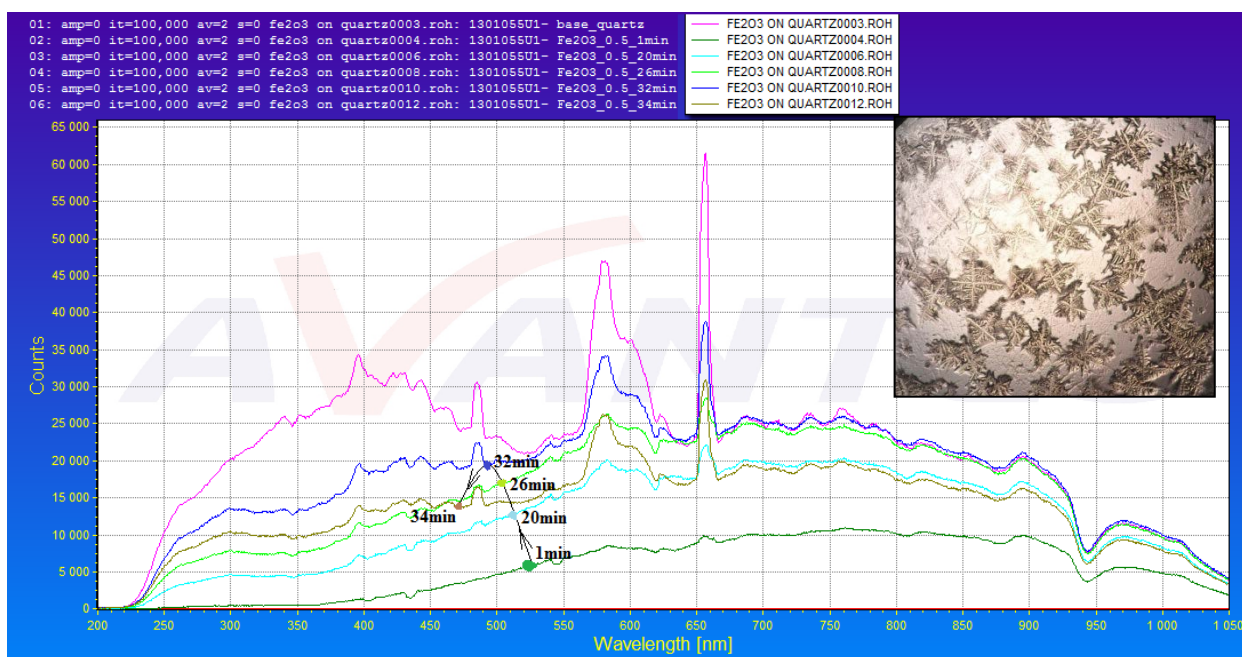


Рис. 7. Испарение 10 мкл капли раствора наночастиц  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (диаметр н/ч 3нм – 5 нм) в физиологическом растворе (1% раствора NaCl в воде) на кварце. Концентрация раствора 0.5 мг/л

Также представлен спектр прохождения светового потока через каплю раствора наночастиц с концентрацией 3 мг/л (рисунок 8). Каких-либо кардинальных различий со спектром на рисунке 7 не замечается.

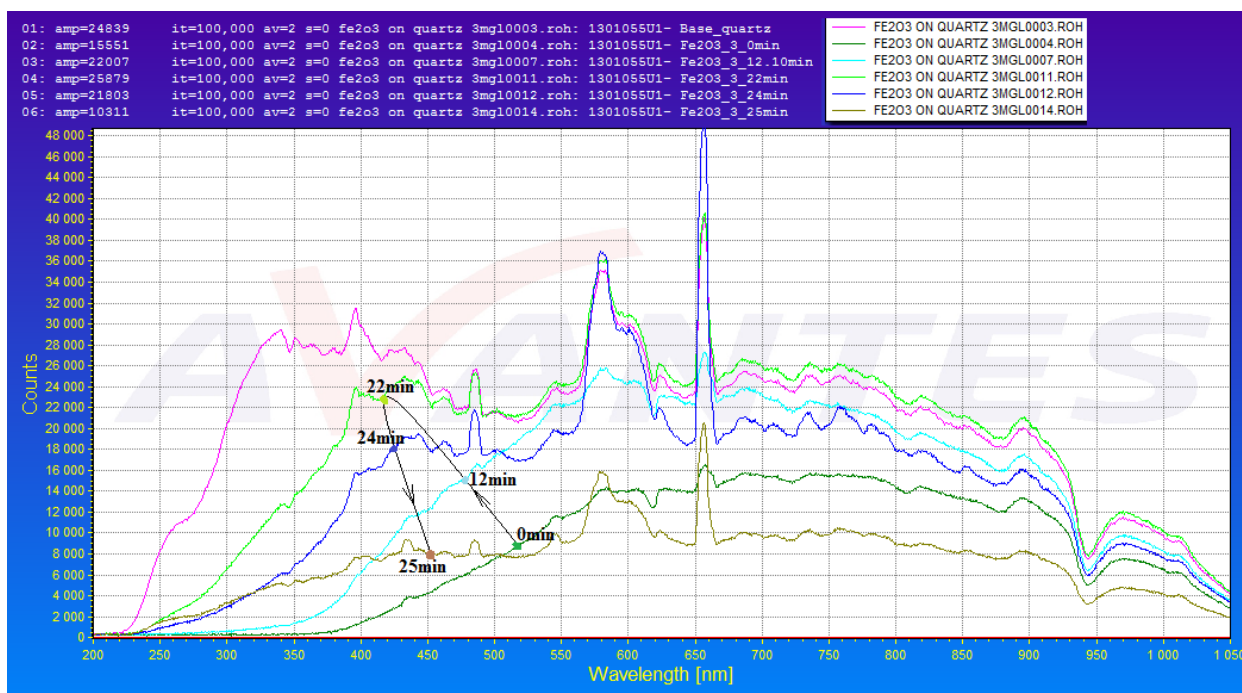


Рис. 8. Испарение 10 мкл капли раствора наночастиц  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (диаметр н/ч 3нм – 5 нм) в физиологическом растворе (1% раствора NaCl в воде) на кварце. Концентрация раствора 3 мг/л

## Течение жидкости по стеклянной подложке

Для снятия спектра прошедшего излучения через пленку движущейся жидкости использовался вышеописанная установка.

Приемник и источник излучения ориентировались в горизонтальной плоскости. Схема опыта и фото установки показаны на рисунке 9 и рисунке 10 соответственно.

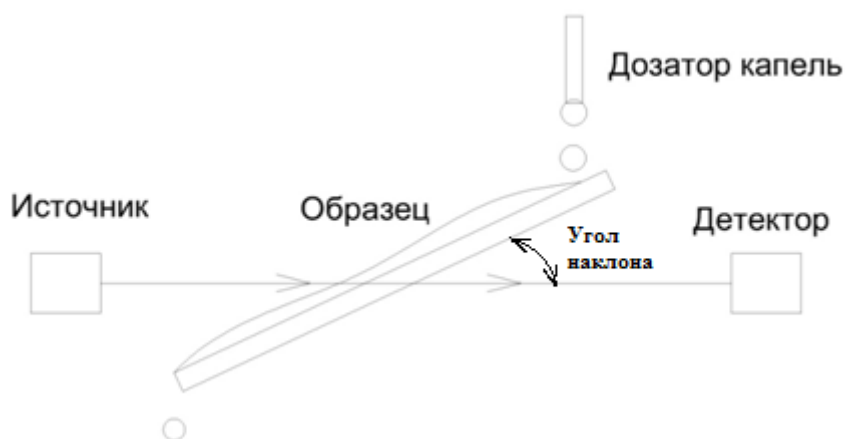


Рис. 9. Схема измерений

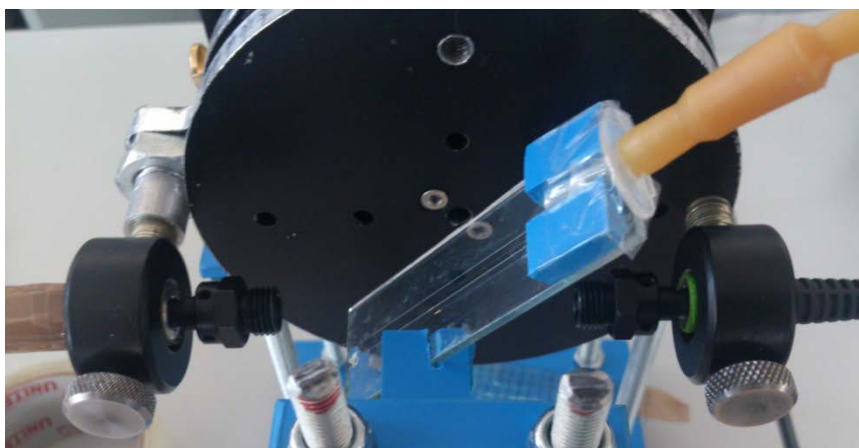


Рис. 10. Фото установки

В качестве наклонной плоскости, по которой текла жидкость, использовалось кварцевая пластина, установленная под углом наклона 80. Такой угол, близкий к вертикальной ориентации, был выбран потому, что под меньшими углами происходило обрезание в ультрафиолетовой области спектра. Для обеспечения течения жидкости в определенном направлении был создан прямолинейный желоб шириной 3 мм.

Дозатор представлял собой наконечник системы для вливания растворов. Расход жидкости регулировался клапанной системой.

Эксперименты с текущими каплями и струей проводились для раствора наночастиц  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0,5 мг/л).

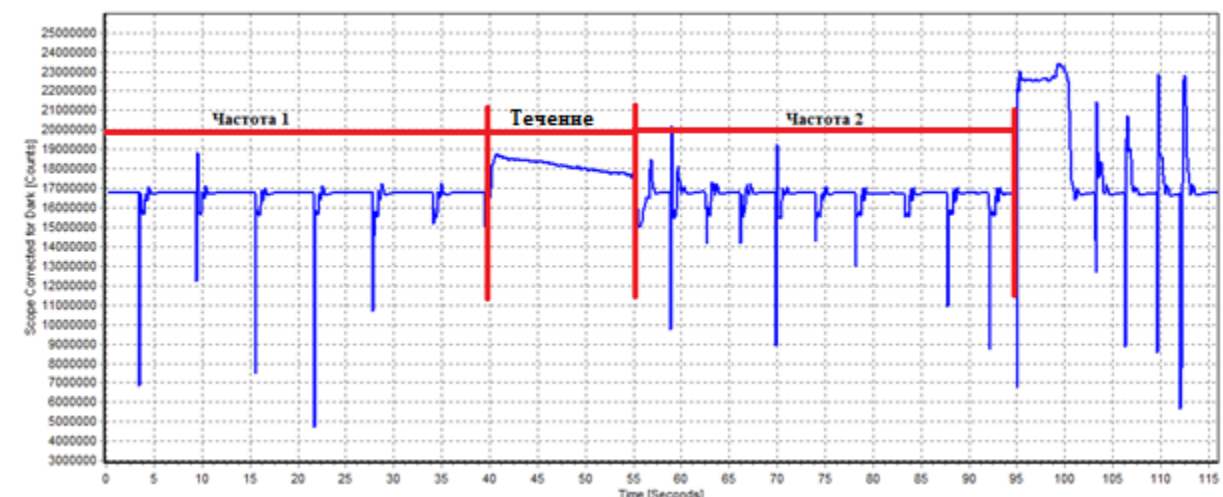


Рис. 11. Освещенность детектора в зависимости от времени для раствора наночастиц  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0,5 мг/л)

На рисунке 11 наблюдается зависимость освещенности детектора (интеграл по длинам волн от спектра прохождения) через капли раствора наночастиц  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  во времени. Варьируя расход жидкости, мы изменяли режимы течения. Начиная с 3 секунды от начала эксперимента до 40 секунды наблюдаются периодические ступеньки, по которым можно определить частоту прохождения капли через световой поток. Это капельный режим течения, т. е. жидкость отрывалась от дозатора определенными порциями. С 55 секунды по 95 секунду наблюдается такой же периодический процесс уже с другой частотой движения капли. В течение 40 секунды по 55 секунду расход жидкости увеличивался и режим течения жидкости приобретал характер струи.

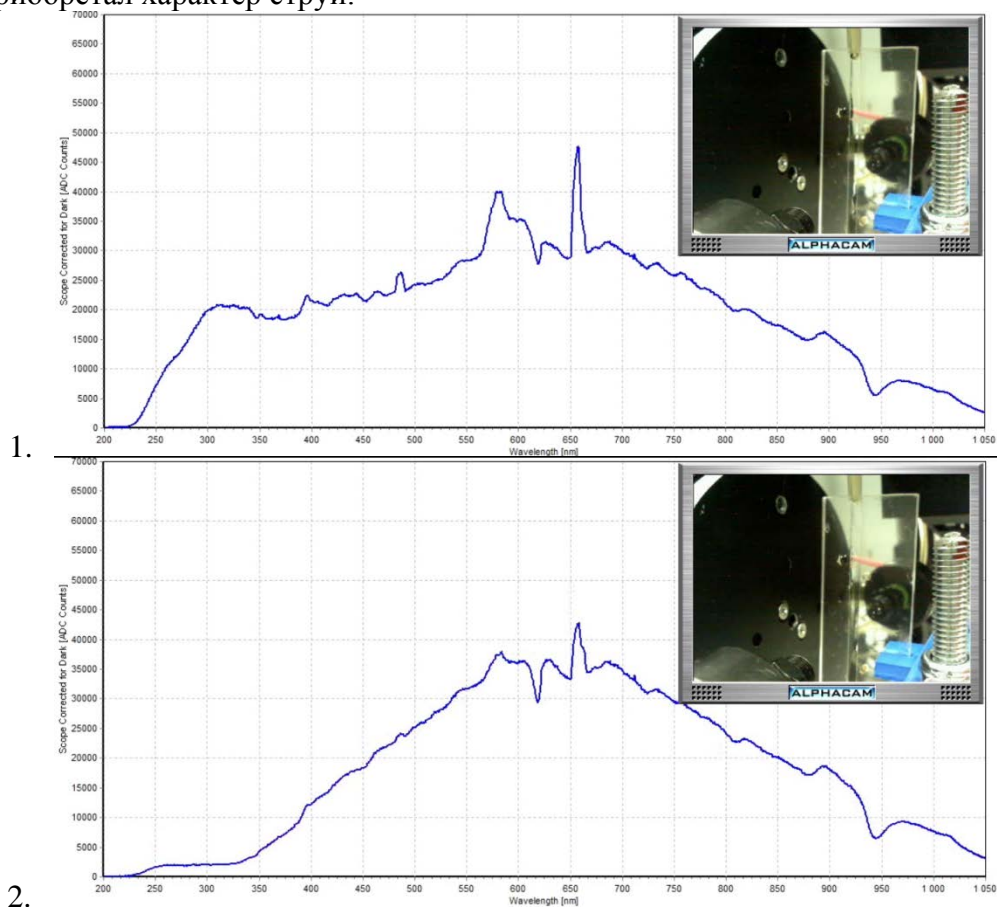


Рис. 12. Спектры прохождения и фото образца для разных моментов времени. Капельный режим течения

На рисунке 12 представлены 2 спектра снятые в разное время. Спектр 1 соответствует моменту когда капля раствора не течет по пластине. Спектры 2 соответствует моменту когда капля попадает в область освещения. На этом изображении видно, что капля раствора наночастиц  $Fe_2O_3$  сильно поглощает излучение вплоть до длины волны 330 нм. А интенсивность видимой области спектра значительно возрастает.

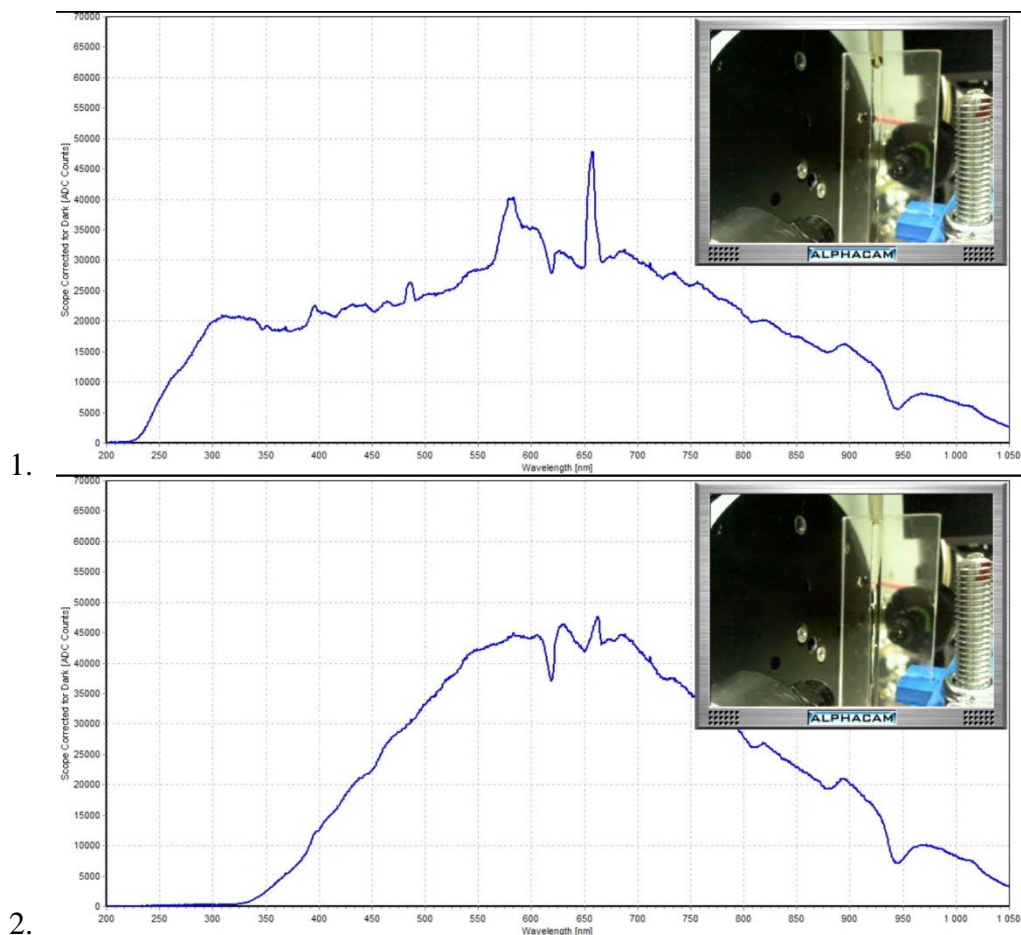


Рис. 13. Спектры похождения и фото образца для разных моментов времени. Струйный режим течения

На рисунке 13 (1) представлен спектр излучения через кварцевую подложку без какой-либо жидкости. На рисунке 13 (2) представлен спектр движущегося раствора наночастиц  $Fe_2O_3$  на кварцевой подложке. На рисунке 13 можно наблюдать как изменяется спектр сквозь движущийся раствор наночастиц  $Fe_2O_3$ : Ультрафиолетовая область обрезается полностью до 330 нм., а в видимой области увеличивается интенсивность излучения.

## Рост и отрыв капли

Схема измерения спектра прохождения представлена на рисунке 14.



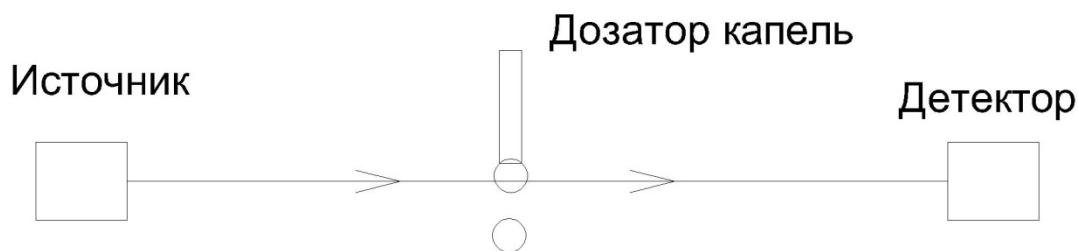


Рис. 14. Схема измерений спектра в опыте с каплей

Исследования излучения через растущую и отрывающуюся каплю проводились для раствора наночастиц  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  с концентрацией 0,025 мг/л. В этом эксперименте использовались те же дозатор капли и система источник-детектор, что и в предыдущем.

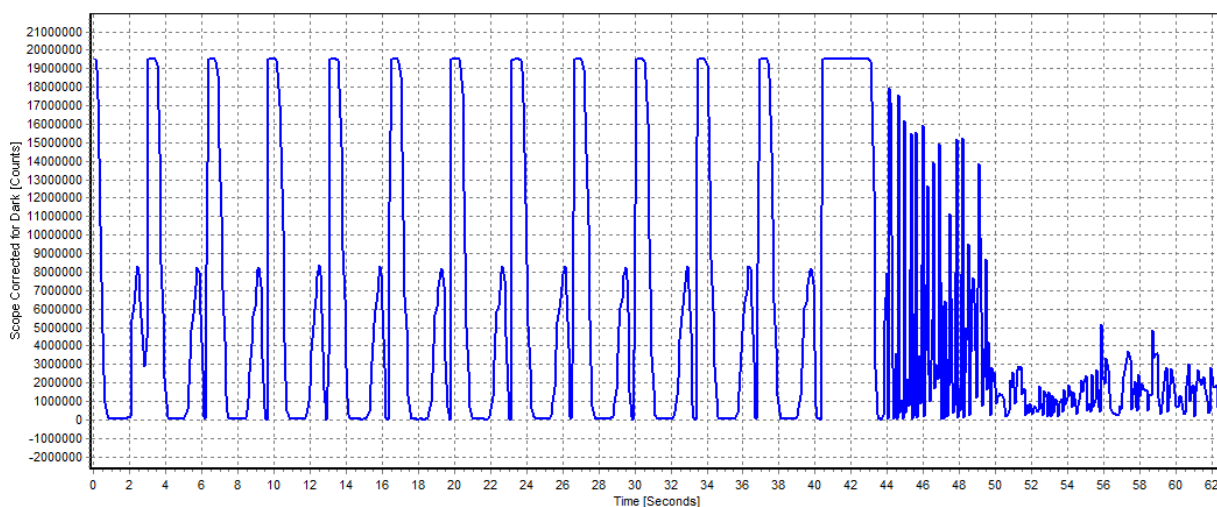


Рис. 15. Освещенность детектора в зависимости от времени для капли раствора наночастиц  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

На рисунке 15 представлен периодический график зависимости освещенности детектора от времени. Наибольшие пики соответствуют моменту, когда капля еще находится в дозаторе и не препятствует световому потоку. Далее, когда капля увеличивается в размерах, но еще не начинает отрываться, можно наблюдать резкое падение освещенности. Рассеяние на капле настолько сильное, что на приемник вообще не попадает излучение. Далее можно наблюдать меньший пик, который соответствует максимальному размеру капли и процессу отрыва капли от дозатора. Затем процесс повторяется.

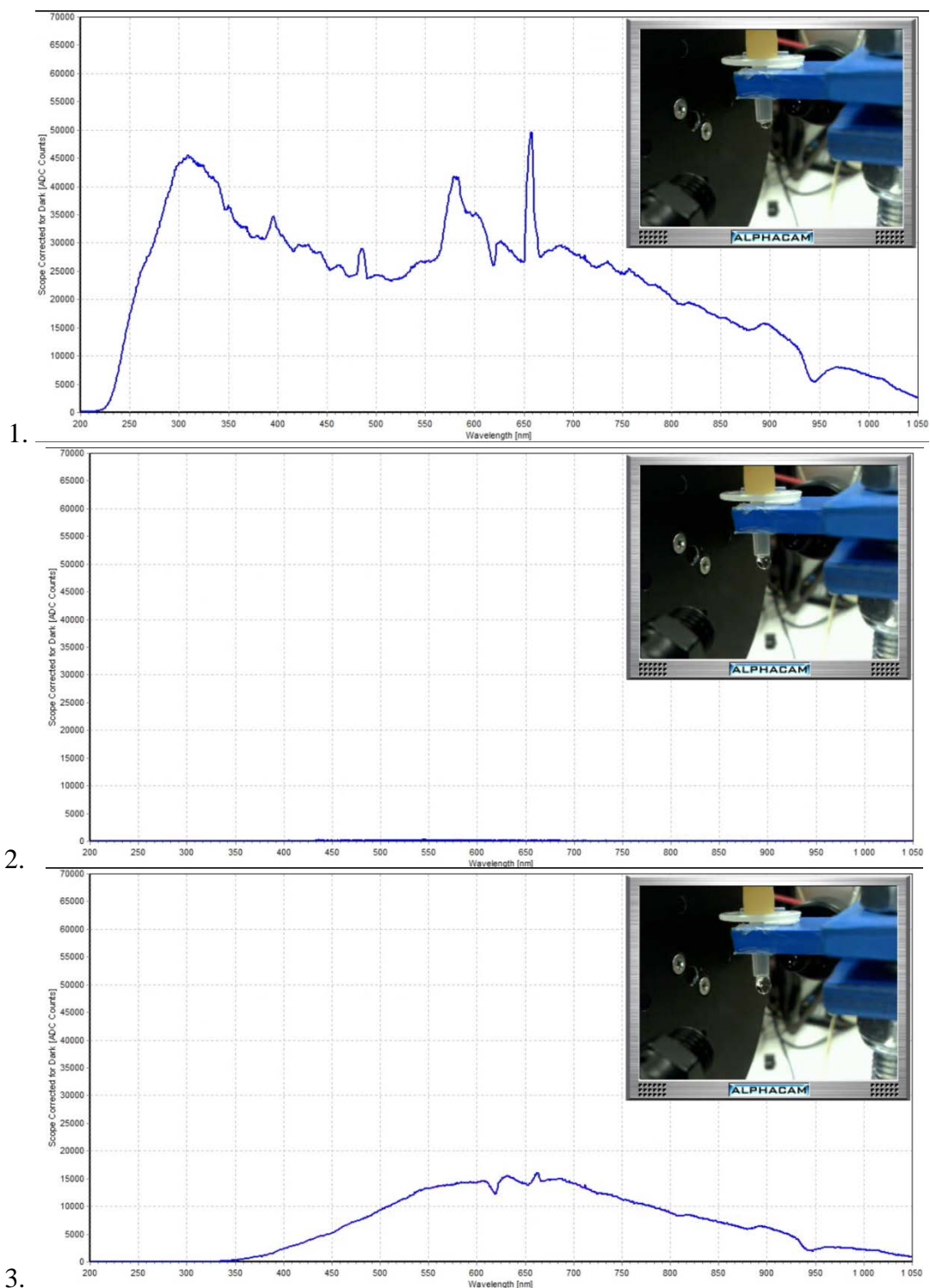


Рис. 16. Спектры прохождения и фото образцов в разные моменты времени

На рисунке 16 представлены спектры прохождения светового потока через каплю раствора наночастиц  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  с концентрацией 0,025 мг/л. На рисунке 16(1) представлен спектр в момент начала роста капли. Капля раствора наночастиц не препятствует распространению света. На рисунке 16(2) – происходит дальнейший рост капли. Заметно, что имеет место практически полное рассеяние светового потока. Это связано с тем, что в область светового пятна попадает поверхность раздела сред жидкость-воздух. На рисунке 16(3) заканчивается рост капли и начинается отрыв ее от дозатора. В то же время происходит частичное прохождение излучения в видимой области спектра. Это связано с тем, что в растворе находятся наночастицы  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , которые сильно поглощают в ультрафиолетовой области.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены измерения спектров прохождения через испаряющиеся капли растворов NaCl в воде и растворов наночастиц Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в воде на двух разных подложках, стеклянной и кварцевой (рисунки 3-8). В отношении спектра прохождения через раствор наночастиц можно сделать вывод, что внедрение наночастиц в раствор существенно влияет на динамику испарения капли. Это можно наблюдать проанализировав спектры прохождения по мере испарения капли. Весь процесс испарения (капля объемом 10 мкл) занимает около 25 минут. В первые минуты после осаждения капли наблюдается сильное поглощение в ультрафиолетовой области спектра, связанное с наличием наночастиц Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В процессе испарения жидкости заметно увеличение интенсивности в ультрафиолетовой области, что вероятнее всего, связано с уменьшением оптической толщины раствора. В определенный момент времени интенсивность спектра достигает максимума и начинается его падение, что скорее всего связано с процессом выпадения в осадок соли NaCl, содержащейся в растворе.

В части движения жидкости по подложке исследовались спектры прохождения как движущейся жидкости по кварцевой пластине, так и жидкости на этой пластине в неподвижном состоянии (горизонтальная ориентация). Жидкостью выступал раствор наночастиц Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с концентрацией 0.5 мг/л. Причем тестировались разные режимы течения: капельный и струйный. На рисунке 17 представлены спектры прохождения света через неподвижную пленку жидкости и через движущуюся жидкость в режиме струйного течения.

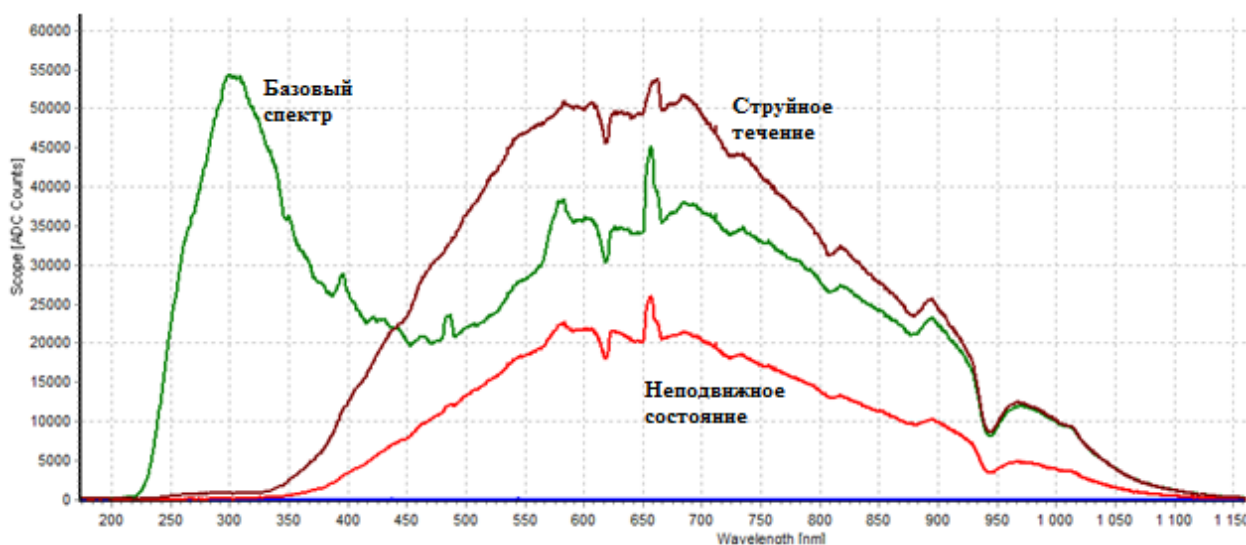


Рис. 17. Спектры прохождения света через неподвижную пленку жидкости и через движущуюся жидкость в режиме струйного течения

Можно сделать вывод, что при движении жидкости, возникает сильное изменение интенсивности прошедшего излучения, по-видимому, вследствие изменения формы профиля движущейся жидкости.

В части исследования отрыва капель (рисунки 15-18) получены спектры прохождения излучения по мере роста капли и последующего ее отрыва от дозатора. Можно сделать вывод, что граница раздела очень сильно влияет на рассеяние света.

D.V. Vorobiev, A.N. Kulikov, P.G. Makarov, V.V. Strechenyuk  
Supervisor A.S. Dmitriev

*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia  
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st, 14, E-mail: 5k3t4@rambler.ru*

## **OPTICAL METHODS OF FLOW DYNAMICS RESEARCHES OF $Fe_2O_3$ NANOPARTICLES SOLUTION**

*This work is devoted to optical methods of researches in the field of  $Fe_2O_3$  nanoparticles solution flow dynamics. For solutions with different concentration of nanoparticles processes of evaporation, motion on the inclined surface and drop avulsion were studied. In this work three solutions with different concentration of nanoparticles on two different surfaces (glass and quartz) are presented for discussion.*

**$Fe_2O_3$  NANOPARTICLES, OPTICAL METHODS, EVAPORATION, MOTION OF THE DROP,  
MOTION OF SOLUTION WITH NANOPARTICLES, DROP AVULSION**