

**СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ “СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ”
ФИЗИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ**

КРАСИМИР СПАСОВ ДАМОВ

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА КИНЕМАТИЧНИЯ ВИСКОЗИТЕТ И МАСОВАТА
ПЛЪТНОСТ НА АЕРОДИСПЕРСНИ СИСТЕМИ С ОГРАНИЧЕН ОБЕМ
ЧРЕЗ АВТОМАТИЗИРАНА ЛАЗЕРНО-ЕЛЕКТРОННА СИСТЕМА**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд за получаване на
образователната и научна степен “доктор”

Професионално направление:

4.1. Физически науки (Радиофизика и физическа електроника)

Научни консултанти: проф. дфн Иван Желязков
проф. дфн Антон Антонов

София
2017

Дисертационният труд се състои от увод, 5 глави, 5 приложения и заключение. Представен е на 169 страници и съдържа 17 таблици и 69 фигури. Цитираната литература включва 118 източника.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на Катедрен съвет на катедра *Радиофизика и електроника* при Физическия факултет на Софийския университет “Св. Климент Охридски”, състоял се на 21.02.2017 г.

Използваната номерация на таблиците и фигурите не съответства на номерацията в дисертацията.

Красимир Дамов бе докторант на самостоятелна подготовка към катедра *Радиофизика и електроника* на Физическия факултет при Софийския университет “Св. Климент Охридски”.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на2017 г. отч. взала на Физическия факултет на Софийския университет “Св. Климент Охридски”, бул. Джеймс Баучър 5, 1164 София.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Физическия факултет, бул. Джеймс Баучър 5 1164 София.

Актуалност на темата

Аеродисперсното състояние на материята е широко разпространено в природата, като резултат от естествените процеси на ерозия на почвата, кондензация на парите и като следствие на антропогенната дейност на човека – емисии на прах, диспергирани течности, продукти на индустриалната дейност и транспорта [1].

Аеродисперсните системи (наричани за краткост *аерозоли*) по същество представляват смес с дисперсна среда въздух или газ и дисперсна фаза, която се състои от диспергирани твърди вещества и/или течности [1, 2].

Аеродисперсните системи играят особено важна роля в природата и живота на човека. Ерозията на почвата, и в следствие разнасянето на частиците от вятъра, изменя земния релеф и условията за отглеждане на селскостопанските култури. Това е наложило създаването на горски пояси за защита на полята, градините и каналите от засипването им с пясък, и срещу отнасянето на почвата от вятъра. Аерозолите, дължащи се на вулканичната дейност, продуктите на индустриалните дейности, транспорта и пр. намаляват пропускането от земната атмосфера на слънчевата радиация. С това, те играят съществена роля в процесите на глобалното изменение на температурата на Земята [1].

Във вид на аеродисперсни системи съществуват и многобройни микроорганизми. Те образуват въздушната микрофлора и играят основна роля в зараждането и разпространяването на епидемии. Много от заразните заболявания като грип, белодробна чума, туберкулоза и др. се пренасят от въздушните течения. Борбата срещу тях се води също чрез аерозоли – диспергиране и разпръскване на съответните препарати [1].

Голямо е значението на аерозолите за науката, особено за експерименталната физика. Известен е забележителният опит на Миликен, при който чрез изследване движението на капки във вертикално електрическо поле за първи път точно са определени зарядът на електрона и числото на Авогадро. Изследванията по образуването на мъгли при кондензацията на преситена пара върху ядра са послужили за основа при създаването на един от важните физични прибори – камерата на Уйлсън. В експерименталната газодинамика, напр. при изучаване на разпределението на скоростта на газовете в моделиращи експерименти, често се използва методът на димните струи [1].

Във военното дело често се прилагат маскировъчните димове, прикриващи придвижването на войсковите подразделения. Понякога важни команди за атака, отстъпление, отбой и пр. се дават чрез сигнални аерозоли (различно оцветени димове). Успешни атаки са се провеждали

чрез разпръскването на отровни газове и аерозоли (химически, радиоактивни, бактериални) [2].

Системи от диспергирани частици се наблюдават и във Вселената като гигантски облаци от прах, получени вследствие на еволюцията на звездите. Такава система по същество не е аерозол (няма въздух), но въпреки това съществува с относителна устойчивост, например като *система със собствен обем*, ограничен от околната среда – междузвезден газ [1].

Всичко гореизложено показва, че изследването на аеродисперсното състояние на веществото е от съществено значение за природата, процесите на Земята и човешката дейност, като представлява един актуален научен и приложен проблем.

Науката за аерозолите израства на основите, положени от много изследователи в различни научни дисциплини, чийто обекти на изследване варират в широки граници [3]. Нейната история, описана от Прейнинг и Дейвис [3] и в компактен вид от Флаган [4], осигурява многостранен поглед върху събитията, хората и организациите, които са допринесли за развитието на науката за аерозолите като важен компонент на природните науки.

Обект на изследване на дисертационния труд

В дисертацията са изследвани моделни аеродисперсни системи с ограничен обем от *първа категория*, при които за генериране на аерозолната фаза се използват процесите на горене, кондензация и сублимация. Като *втора категория* ще отбележим системите, които се получават при продухване с въздушен поток на вещество в прахообразно състояние. Този процес се нарича флуидизация на прахове и намира приложение при технологиите (химически, хранително–вкусови и др).

Целта на настоящия дисертационен труд е разработването на метод и устройство (основаващи се на лазерното светоразсейване) за измерване на понижаването с времето на свободната граница на аерозол с ограничен обем, при неговото изтичане под действие на допълнителното налягане на аерозолната фаза, като резултатите от измерване се трансформират в данни за кинематичния вискозитет и плътността на аерозола.

За изпълнението на тази цел бяха поставени следните задачи:

1) Да се разработи устройство за автоматично измерване на понижението с времето на свободната аерозолна граница на аерозол с

ограничен обем при изтичането му, под действие на допълнителното налягане на аерозолната фаза, на базата на лазерното светоразсейване.

2) Да се определи зависимостта на кинематичния вискозитет на аерозола от неговия обем и изменението му с времето при еволюцията на аерозолната система.

3) Да се изследва зависимостта на плътността на аерозолната фаза от обема на аерозола и нейното изменение с времето при еволюцията на аерозолната система.

4) Да се изследват зависимостите на плътността на аерозолната фаза от електрични и магнитни полета, приложени при формирането на аерозолната система.

5) На базата на разработената методика да се намери обобщена характеристика на аерозол с ограничен обем чрез функцията на разпределение по масова плътност на аерозолната фаза.

Структура на дисертационния труд

Дисертационната работа се състои от въведение, пет глави, заключение с основните приноси и приложения.

В Глава 1 е направен обзор на съществуващите изследвания на аеродисперсни системи с ограничен обем. Систематизирани са според начина на формиране в две категории и подробно са сравнени техните свойства.

В Глава 2 са изложени теоретичните основи на метода за определяне на кинематичен вискозитет на аеродисперсни системи с ограничен обем чрез измерване на понижението на свободната аерозолна граница с течение на времето при изтичането на аерозола под действие на допълнителното налягане на аерозолната фаза.

В Глава 3 са описани конструкцията и действието на устройства за реализиране на измерванията, изложени в Глава 2.

В Глава 4 са представени експериментални резултати от изследване на зависимостта на кинематичния вискозитет на аеродисперсни системи от техния обем и изменението на вискозитета с времето в процеса на еволюцията им. Изложени са резултатите от оценката на най-фината фракция в аеродисперсни системи с ограничен обем, получени на базата на данните за кинематичния им вискозитет.

В Глава 5 са представени експерименталните резултати от изследване на зависимостта на плътността на аерозолната фаза от обема на аерозолните системи и изменението ѝ с времето в процеса на еволюцията им. Изложени са и резултатите от изследване на влиянието на електрични и магнитни полета, приложени при формирането на системата, върху плътността на аерозолната фаза.

В раздела *Приложения* са представени:

Приложение 1 – Фотографии на аеродисперсни системи с ограничен обем.

Приложение 2 – Запис на резултатите от пълен експеримент за измерване на кинематичния вискозитет на аеродисперсна система с ограничен обем с Установка 1.

Приложение 3 – Запис на резултатите от пълен експеримент за измерване на масовата плътност на аеродисперсна система с ограничен обем с Установка 1.

Приложение 4 – Класификация на изследваните видове цигари по тип според стойностите на кинематичния вискозитет на дима им. Представени са данни за масата на катраните и никотина на изследваните видове цигари.

Приложение 5 – Запис на резултатите от пълен експеримент за измерване на кинематичния вискозитет и масовата плътност на аеродисперсна система с ограничен обем с Установка 2.

Изследванията по дисертацията са проведени в лабораторията *Физика на аерозолите* към катедра *Физика* на Природо-математическия факултет при Югозападния университет “Неофит Рилски” – Благоевград. Получените резултати са докладвани на наши и международни конференции и са обект на публикации в научни списания.

Кратко изложение

В Глава 1, Параграф 1.1 са разгледани най-общите свойства на аеродисперсните системи. Класифицирани са според произхода на частиците на аерозолната фаза на първични, коагулационни и дисперсни. Описани са основните характеристики на отделните частици, като размер, форма и строеж.

Разгледани са две от разпределенията на аерозолните частици по размери – Гаусово и логаритмично-нормално.

Разгледани са протичащите процеси на коагулация и седиментация в аеродисперсните системи и законите, които ги описват. Обърнато е внимание още и на два от законите, характеризиращи движението на флуидите (на Нютон и на Поазьой), приложими и при аеродисперсните системи с ограничен обем.

В Параграф 1.2 са разгледани общите свойства на аеродисперсните системи с ограничен обем, формирани при наличие на генератор на аерозолна фаза, в отсъствие на въздушен поток. Те са класифицирани като *първа категория*. Много от свойствата им са присъщи и на течностите: приемат формата на съда, в който се намират; запазват и съхраняват хоризонтална и плоска граничната повърхност; проявяват

хидростатични свойства при изтичане и пр. Други от свойствата им ги правят по-близки до газовете – вътрешното им триене (вискозитет), плътността им и др. Аеродисперсните системи с ограничен обем проявяват и специфични свойства – бърза седиментация на фазата и на граничната повърхност, непрекъснато намаляване на плътността, коагулация на частиците, флуктуации в разпределението на плътността и на температурата и пр. Фукс е първият изследовател на аеродисперсното състояние, който го сравнява с това на течностите [1]. По късно, от Антонов и съавтори [5] то за първи път вече е наречено *квазитечно*. Оказва се, че това състояние е присъщо на аеродисперсните системи с ограничен обем, системно изследвани в [5–9].

В Параграф 1.3 е отделено внимание и на аеродисперсните системи от *втора категория*, които се получават при продухване с въздушен поток на вещество в прахообразно състояние [10]. Този процес се нарича флуидизация на прахове и намира приложение при технологиите (химически, хранително-вкусови). Обемът на тези системи зависи от скоростта на въздушния поток. Тези системи също наподобяват на течност поради наличието на хоризонтална граница аерозол–въздух.

В Параграф 1.4 е направено сравнение между приликите и разликите между свойствата на системите от двете категории. Подчертано е, че особено важен и нерешен за аерозолите от първата категория проблем е да се намерят методи за определяне на вискозитета, допълнителното налягане на аерозолната фаза, както и на масовата плътност на последната. *Данни за това не са открити в съществуващата литература, което и определя интереса към създаването на методи за тяхното измерване.*

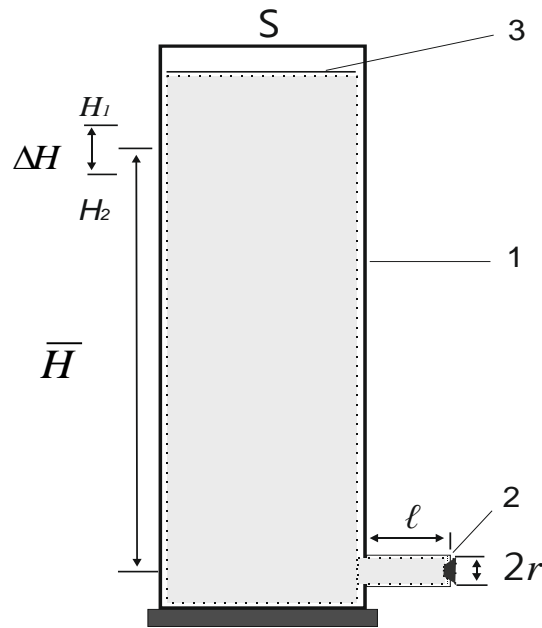
В Глава 2 е направен обзор на методите и уредите за измерване на вискозитета на флуиди и тяхната приложимост за определяне на вискозитета на аерозоли. Достига се до извода, че най-подходящи за целта са *капилярните*. Отличават се с проста конструкция, елементарен процес на измерване, широк измервателен диапазон. С подобен вискозиметър, в който двигателната сила се получава при изтичане на вода от съд, са измерени времената на изтичане на определен обем от въздух и от аерозол. Полученото различие във времената е в границите на статистическата грешка. Направени са следните заключения:

- Динамичният вискозитет на аерозолите и на въздуха са сравними по стойности, т.е. те са от един порядък.

- Капилярният метод, типичен за газове, по принцип може да бъде приложен и за аеродисперсни системи, но само след модифициране.

В развития метод за определяне на вискозитета на аеродисперсни системи с ограничен обем, обект на дисертационния труд, разликата в налягането Δp се създава от хидростатичното налягане на дисперсната фаза.

На фигура 1 е представена принципната схема на разработения метод. Вертикален съд 1 със сечение S се напълва с аерозол до дадено ниво на хоризонталната граница аерозол–въздух 3. Пуска се аерозолът да изтича под действието на собственото му хидростатичното налягане през калибрирана хоризонтална тръба 2 с дължина ℓ и диаметър $2r$, поставена над дъното на съда. Регистрира се интервалът от време Δt за понижаване на хоризонталната граница от произволно ниво H_1 до ниво H_2 .



Фигура 1. Принципна схема, илюстрираща същността на метода за определяне на вискозитета на аерозолни системи с ограничен обем. На схемата: 1 – вертикален съд, 2 – калибрирана хоризонтална тръба, 3 – граница аерозол–въздух.

След прилагане на закона на Поазьой за изтеклия през изходната тръба аерозол с обем ΔV_1 и допускане, че аерозолът е несвиваем, се получава формулата

$$v = \frac{\eta}{\rho} = -\frac{\pi r^4 g}{8 \ell S} \frac{\bar{H}}{\Delta H} \Delta t = -b \frac{\bar{H}}{\Delta H} \Delta t, \quad (1)$$

където $b = \pi r^4 g / 8 \ell S$.

При изтичането на аерозола височината \bar{H} намалява с времето и може да положим $\bar{H} = \bar{H}(t)$. От времето на изтичане зависи и интервалът Δt , в който границата се понижава с $\Delta H = H_2 - H_1 = \text{const}$ около дадено средно ниво \bar{H} . В този смисъл от формула (1) може да приемем, че кинематичният вискозитет ν е функция на времето. Той може да се определи, следователно, посредством измерване на времето от началото

на изтичането до момента, в който хоризонталната граница достигне дадено ниво.

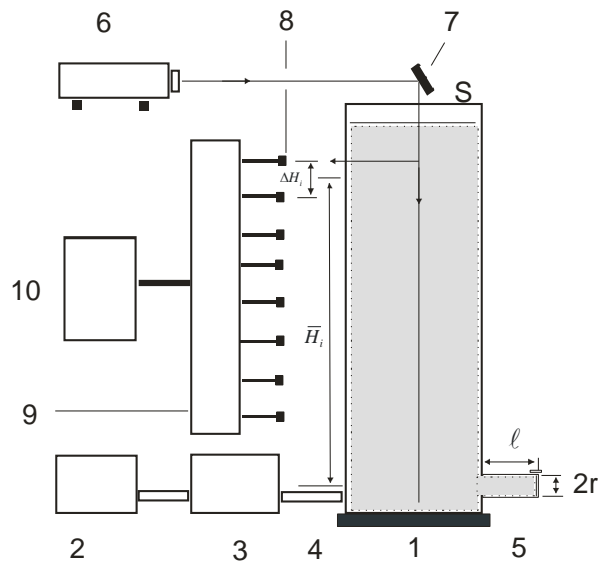
В Глава 3 са анализирани някои методически съображения при конструиране на устройството за определяне на кинематичния вискозитет на аерозолни системи с ограничен обем и е направена обосновка на използването на лазерното светоразсейване за повишаване на точността. Апаратурната реализация включва (фиг. 2):

- Измервателна камера с аерозол 1, подлежащ на изследване
- Съд 2 с първоначално формиран аерозол
- Перисталтична помпа 3
- Тръба 4 за напълване с аерозол на измервателната камера
- Изходна тръба 5 с диаметър $2r$ и дължина l
- He–Ne-ов лазер 6 за определяне на положението на горната граница на аерозола
- Огледало 7, пренасочващо лъча на лазера по оста на камерата
- Фотоприемници с усилватели 8 за сканиране на понижението на горната граница на аерозола, посредством разсеяната лазерна светлина
- Електронен блок 9 за усилване на сигнала от фотоприемниците и съгласуване на нивото му с персоналния компютър
- Персонален компютър 10 за регистриране на времевите интервали, изчисляване на вискозитета, статистическа обработка, визуализиране, разпечатване и съхраняване на получените резултати

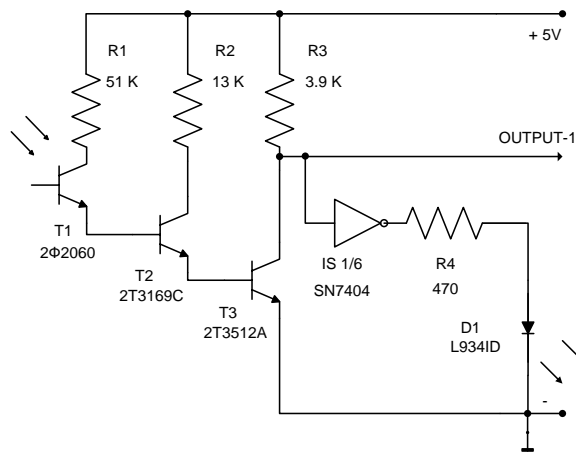
Изработени са два варианта на установки за определяне на кинематичния вискозитет на аеродисперсни системи с ограничен обем. В процес на конструиране е и трети вариант.

В първият вариант (Установка 1), като фотоприемници бяха използвани осем броя фототранзистори 2Ф2060 с осем еднотипни усилватели. Схемата на един от тях е представена на фигура 3. Сигналят от фототранзистора Т1 се усилва от каскадно свързаните транзистори Т2 и Т3. Те са с малък собствен шум и голямо усилване, което води до режим на работа на усилвателя близък до ключовия.

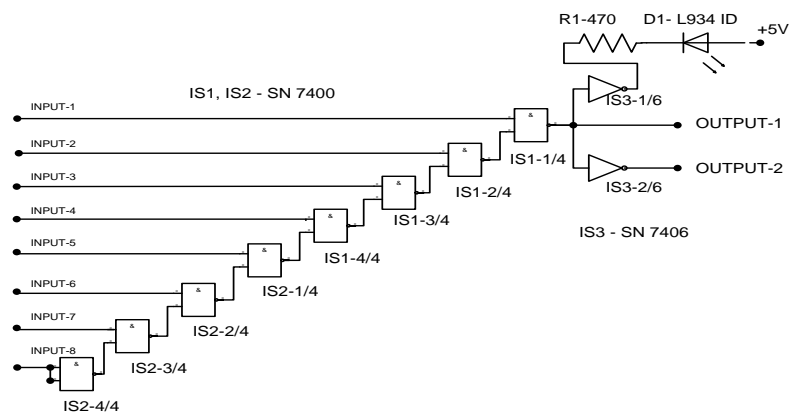
След усилване сигналят от фотоприемниците се подава на електронния блок 9 (съгласно фигура 2), представен детайлно на фигура 4. Задачата му е да изработи цифров изходен сигнал, чийто преходи между логическа нула и единица съответстват на преминаването на хоризонталната граница на аерозола при изтичане през нивата на съответните фотоприемници. Изработен е с TTL интегрални схеми. Изходният сигнал се подава на персонален компютър със съответното програмно обезпечение.



Фигура 2. Обща схема на устройството за измерване на кинематичния вискозитет на аерозоли с ограничен обем.

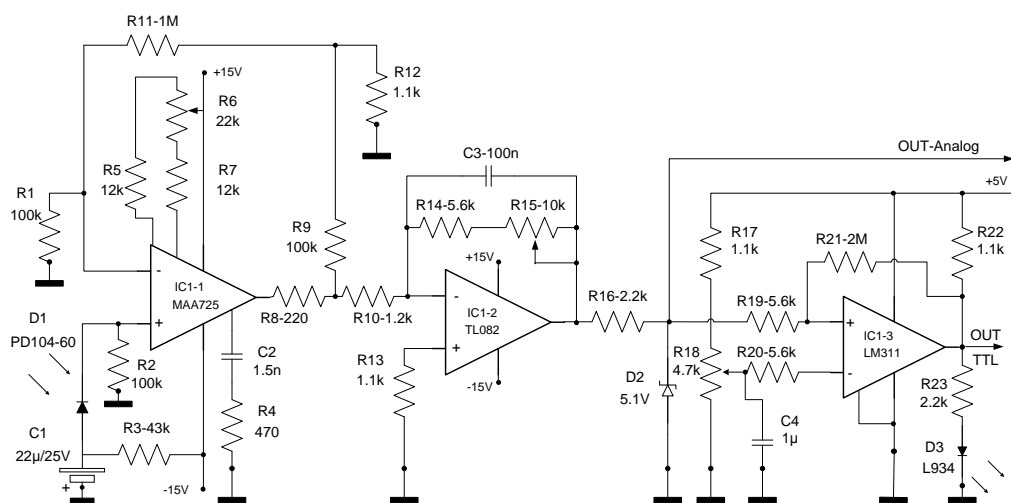


Фигура 3. Електронна схема на един от блоковете за усилване на сигнала от входния фототранзистор T1 (Установка 1).



Фигура 4. Схема на електронен блок, изработващ цифров изходен сигнал с преходи, съответстващи на преминаването на хоризонталната граница на аерозола през нивата на съответните фотоприемници (Установка 1).

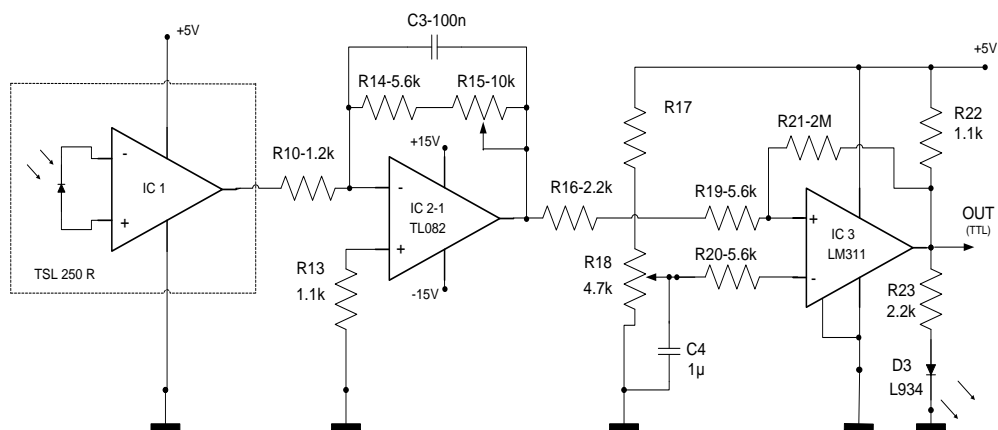
Във втория вариант (Установка 2) на устройството за определяне на кинематичния вискозитет на аеродисперсни системи с ограничен обем бяха използвани като фотодатчици 16 броя фотодиоди PD104-60, тип PIN. Включени са във фотодиоден режим. Те са с повишено бързодействие и добра линейност на преобразуване “светлинен поток–електричен ток”. Това позволява повишаване на точността на измерване, както и аналоговото регистриране на разсеяния светлинен поток. Електронната схема на един от блокове 1–16 (съгласно фигура 2) е представена на фигура 5. Първото стъпало на усилвателите е изпълнено с инструменталния операционен усилвател MAA-725, при фиксиран коефициент на усилване 900. Второто стъпало е изпълнено с нискошумящия операционен усилвател TL-082, при регулируем коефициент на усилване от 5 до 15. По този начин, посредством тример-потенциометри, се изравняват коефициентите на усилване на каналите на установката. Аналоговите сигнали (AUT-Analog) са изведени на куплунг. Компараторът LM-311 изработва сигнал логическа единица при ниво на изходния аналогов сигнал по-високо от зададеното чрез потенциометъра R18. Цифровите сигнали (OUT-TTL) също са изведени на втори куплунг.



Фигура 5. Електронна схема на един от блокове 1–16 (Установка 2).

В процес на изграждане е нова установка на базата на по-съвременни електронни компоненти и модули. Бяха експериментирани два (от общо 16-те) еднотипни оптоелектронни модули изградени с оптосензори TSL 250 R (Texas Instruments), които ще заместят входните стъпала. Те имат максимум на светочувствителност в червената област, където излъчват наличните ни лазери (He–Ne-онови и LED).

Направените експерименти показаха отлични резултати. Принципната схема на един от 16-те модула е показана на фигура 6.



Фигура 6. Принципна схема на един от 16-те оптоелектронни модули, изградени с оптосензори TSL 250 R (Установка 3).

В Установка 3 за връзка с персоналния компютър ще бъде добавен конвертиращ модул “USB to UART–FT232RL”. Той е от серийно произведените, тип “plug and play” и се захранва от USB порта на РС.

Описан е редът за провеждане на отделен експеримент. В таблица 1 са представени получените стойности за кинематичния вискозитет на няколко вида аерозоли с ограничен обем, с помощта на изложената методика. На 9-тия ред е даден за сравнение кинематичния вискозитет на въздуха, при 20 °С и нормално атмосферно налягане (таблични данни [11]).

Таблица 1. Стойности на кинематичния вискозитет на няколко вида аерозоли, получени по изложената методика

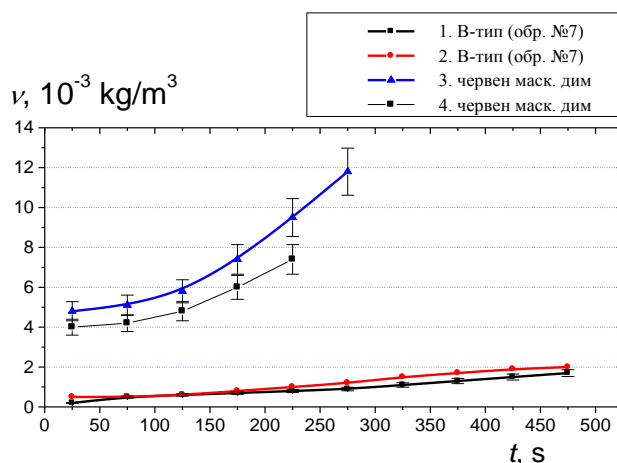
№	Вид аерозол	ν [10^{-4} m ² /s]
1	дим от цигара (Образец № 7 от табл. П4.1)	5.0 ± 0.3
2	дим от цигара (Образец № 1 от табл. П4.1)	4.7 ± 0.2
3	пари от парафин	3.9 ± 0.2
4	пари от глицерин	10 ± 2
5	пари от амониев хлорид	13.5 ± 0.6
6	пари от колофон	9.6 ± 1.5
7	маскировачен дим ДМ-11, бял	5.3 ± 0.2
8	маскировачен дим РДГ-2, червен	13 ± 2
9	въздух, при 20 °С	0.14

От приведените резултати се вижда, че кинематичният вискозитет на аерозолите с ограничен обем е с един-два порядъка по-голям от този на въздуха.

Посочени са основни данни (структура, разпределение по размери, бройна концентрация) за аеродисперсните системи, цитирани в дисертационния труд: дим от цигари, парафин, глицерин, амониев хлорид, колофон, маскировачни димове. Показана е и собствена фотография на голям агрегат (около 5–8 μm), образуван от струпването на много частици от дима на цигари Davidoff. Край него са заснети и отделни самостоятелни частици. Формата им е близка до кълбовидната, а размерът им е определен приблизително на 0.2–0.4 μm .

В Глава 4 са изложени конкретни експериментални резултати, получени за кинематичния вискозитет на различни аеродисперсни системи с ограничен обем. Най-често като аерозол е изследван дим от различни марки цигари. След приключване на експериментите те са разделени на 3 типа (таблица П4.1 от Приложение 4), според вече получените данни за кинематичния вискозитет на дима им. А-тип димове от цигари са тези със стойности на вискозитета $>11.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, В-тип – тези със стойности на вискозитета $<10.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Останалите, с междинните стойности на вискозитета $(10.0\text{--}11.5) \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, са причислени към АВ-тип. В таблица П4.2 (Приложение 4) са поместени данни за съдържанието на катрани и никотин на изследваните видове цигари.

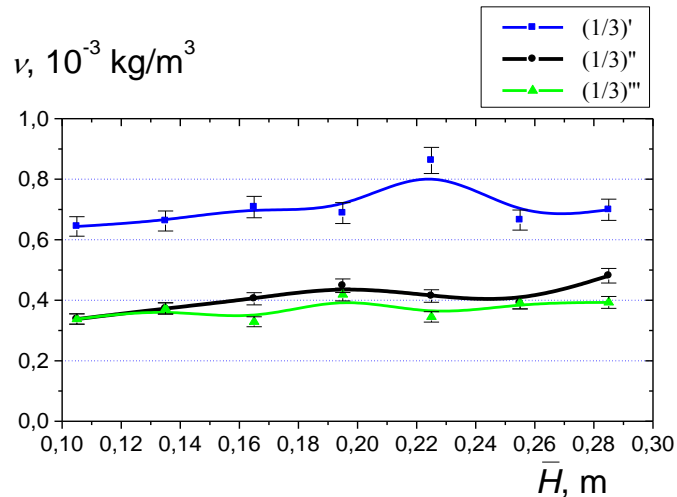
На фигура 7 е приведена зависимостта на кинематичния вискозитет на два типа аеродисперсни системи от времето на изтичане. Криви 1 и 2 се отнасят за В-тип цигарен дим (образец № 7, като двата експеримента са направени в един и същи ден), а 3 и 4 – за червен маскировъчен дим (двата експеримента също са направени в един ден). Използвана е измервателна камера от плексиглас, с квадратно сечение (размер на страната $a = 67 \text{ mm}$) и височина 450 mm. Изходната тръба (от мед) е с диаметър 8 mm и дължина 30 mm. Опитите са извършени при температура 20 °С, влажност 65% и атмосферно налягане 970 hPa. На всеки 50 s се отчита височината на горната аерозолна граница \bar{H}_i . Кинематичният вискозитет се пресмята по формула (1).



Фигура 7. Зависимост на кинематичния вискозитет на два вида аеродисперсни системи от времето на изтичане. Криви 1 и 2 се отнасят за цигарен дим от В-тип (образец № 7), 3 и 4 – за червен маскировъчен дим.

От фигура 7 се вижда, че кинематичният вискозитет на маскировъчния дим е на порядък по-голям от този на цигарения дим. Различието в стойностите на вискозитета на цигарените димове (по между им), което констатирахме при многото експерименти, е значително по-малко отколкото онези на маскировъчните димове. Последните са с различия в пиротехническия състав и развиват различни температури по време на горене.

С димът от една цигара може три пъти да се напълни измервателната камера. Ето защо цигарата е разделена условно на три части. На фигура 8 е показана зависимости на кинематичния вискозитет на дима, получен от третинките на една цигара (образец № 7), от височината на горната аерозолна граница. Очевидно, че с намаляване дължината на цигарата при горене, вискозитетът на дима също намалява. При различните типове и видове дим тази тенденция се запазва, но в различна степен. Може да се предположи, че това се дължи както на различията в типа дим, така и на намаляването на филтриращата способност на остатъка от цигарата, с намаляване дължината ѝ при горене. Димът в измервателната камера става по-грубодисперсен и това води до понижаване на вискозитета.



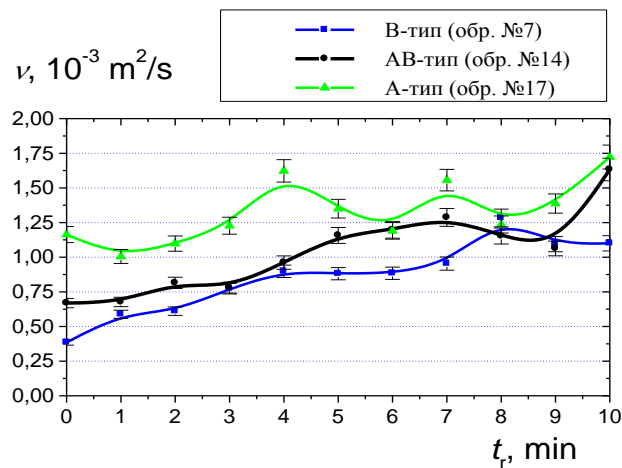
Фигура 8. Зависимости на кинематичния вискозитет на В-тип дим, получен от третинките на една цигара (образец № 7), от височината на горната граница на аерозола.

С цел да получим комплексна характеристика за дима на даден тип цигара, след напълване на измервателната камера при серия от експерименти, тютюневият дим се остава да престои в последната различно време t_r (време на задържане). То се изменя от 0 до 10 min, през 1 min, като за всяка конкретна стойност аерозолът се пуска да изтича и се измерва кинематичният му вискозитет.

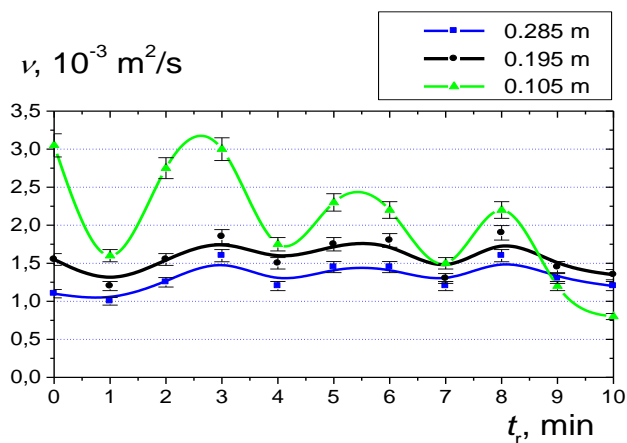
Зависимостите на средната стойност на кинематичния вискозитет от t_r , при три типа аерозоли [А-тип (образец № 17), АВ-тип (образец № 14) и В-тип (образец № 7)], са показани на фигура 9. Направено е осредняване между отделните третинки на цигарите за всяко време на задържане. Вижда се, че при цигарите с по-малко съдържание на катрани и никотин (А-тип аерозол) стойностите на кинематичния вискозитет на дима им са по-големи, а средноквадратичните грешки – съответно по-малки.

На фигура 10 са показани зависимостите на кинематичния вискозитет на В-тип аерозол (образец № 7) от времето на задържане при три различни височини на горното ниво на аерозола. \bar{H}_1 представя осреднения вискозитет от пет опита, при изтичане между 1-ви и 2-ри фотосензори $\bar{H}_1 = 0.5 (H_1 + H_2)$; съответно \bar{H}_4 и \bar{H}_7 – при изтичане между 4-ти и 5-ти и между 7-ми и 8-ми.

При $t_r = 1, 4$ и 7 min се наблюдава сближаване между кривите, т.е. постоянство на вискозитета по височината на аерозола в камерата. Предполагаме, че става дума за създаването на времеви и пространствено-устойчиви структури с повишена степен на хомогенност. Тези резултати могат да се използват за характеризирание на даден аерозол и съответното изделие (цигари, пури).



Фигура 9. Зависимости на средните стойности на кинематичния вискозитет на три типа аерозоли от времето на задържане.

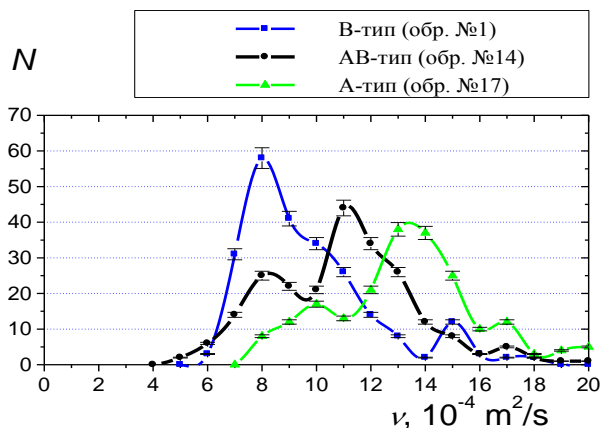


Фигура 10. Зависимости на кинематичния вискозитет на В-тип аерозол (образец № 7) от времето на задържане при три различни височини на горното ниво на аерозола.

Особен интерес представляват диаграмите на разпределение по стойности на кинематичния вискозитет на дима, получен от различни видове цигари. По хоризонталната ос е нанесен целия интервал от възможни стойности на вискозитета $\nu = (1-20) \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, разделен на подинтервали $\Delta\nu = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. По вертикалната ос точките съответстват на броя на стойностите на кинематичния вискозитет, попадащи в съответния подинтервал.

На фигура 11 са показани диаграми, получени по гореописания начин, построени за три типа аерозоли [А-тип (образец № 17), АВ-тип (образец № 14) и В-тип (образец № 1)] при времена на задържане t_r от 0

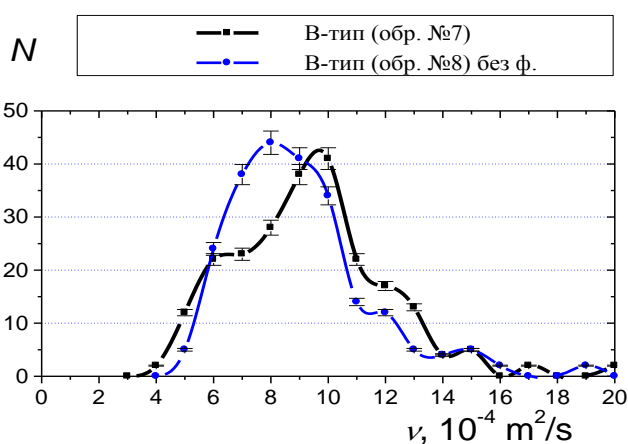
до 10 min. Тези диаграми са наречени от нас *спектр на състоянието на аеродисперсна система*, който характеризира нейната еволюция.



Фигура 11. Диаграми на разпределение по стойности на кинематичния вискозитет (спектри на състоянието) на три типа аерозоли.

От фигура 11 се вижда, че за дима от цигари с по-ниско съдържание на катрани и никотин [в случая А-тип (образец № 17)] максимумът на спектрите е отместен вдясно, т.е. в посока на нарастване на вискозитета.

За да се оценят качеството и влиянието на даден вид филтър може да се сравнят спектрите на състоянието на даден тип аерозол, получен от цигари с филтър и без филтър (откъснат филтър). На фигура 12 са показани този тип спектри за В-тип аерозол – при наличие на филтър (образец № 7) и при отсъствие на филтър (образец № 8). Липсата на филтър прави дима по-грубодисперсен. Това води до отместване на спектъра вляво, т.е. в посока на намаляване на вискозитета.



Фигура 12. Диаграми на разпределение по стойности на кинематичния вискозитет на В-тип аерозол – при наличие на филтър (образец № 7) и при отсъствие на филтър (образец № 8).

От приведените експериментални резултати за кинематичния вискозитет на различни типове и видове аерозоли (цигарен дим) се вижда, че *стойностите на вискозитета могат да се използват за характеризирание както на съдържанието на катрани и никотин в цигарите, така и качеството на филтрите*. Считаме, че тази методика може да има приложение в цигарената промишленост, наред с другите стандартни методи.

В Параграф 4.5 е направена оценка на най-фината фракция в аеродисперсни системи с ограничен обем. В предходната глава показахме, че при еволюцията на аеродисперсните системи с ограничен обем кинематичният им вискозитет ν нараства с времето на еволюция, т.е. с времето на задържане t_r . Нашите експерименти показаха, че при времена на задържане по-големи от 10 min, аерозолната система практически престава да изтича. Това вероятно се дължи на намаляването на плътността ρ на аерозолната фаза, чиято стойност е в знаменателя на израза за кинематичния вискозитет $\nu = \eta / \rho$. Намалява и хидростатичното налягане $\Delta p = \rho g h$, като от един момент нататък то става недостатъчно, за да предизвика изтичането на аерозола. Представлява интерес да се провери дали с изложената методика може да се оцени еволюцията на аеродисперсна система за време на еволюция по-голямо от 10 min.

В Параграф 4.5 показваме, че може да се получи известна информация за поведението на аерозолните системи при по-голямо време на еволюция, чрез измерване времето им на изтичане и апроксимация на получените резултати за случая, когато плътността клони към нула, т.е. при $t_r \rightarrow \infty$. В този случай за изчисляване масата m_a на частиците на най-фината фракция е получена формула (2):

$$m_a = \frac{b^* k T}{g} . \quad (2)$$

където g е земното ускорение, k – константата на Болцман, T – абсолютната температура, а b^* е експериментално определена величина (от всеки конкретен експеримент), съгласно формула (1).

При предположение, че частиците са сферични с радиус r , масата им изразена чрез обема V и плътността ρ_a на веществото на аерозолните частици ще бъде

$$m_a = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_a . \quad (3)$$

Замествайки m_a от (3) в (2), за радиуса на частиците се получава

$$r = \sqrt[3]{\frac{3 b k T}{4 \pi g \rho_a}}. \quad (4)$$

Резултатите за масата m_a на най-фината фракция, пресметнати по формула (2) при $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K, $T = 293$ K, $g = 9.81$ m/s² са представени в таблица 2.

Таблица 2. Маса m_a на най-фините аерозолни частици

Аерозол	А-тип	В-тип	АВ-тип
дим от цигари	Образец № 17	Образец № 7	Образец № 12
$m_a, 10^{-21}$ kg	5.39	5.14	4.77

За да изчислим радиуса на аерозолните частици по формула (4) трябва да зададем стойност на плътността ρ_a на веществото им, когато плътността на аерозолната фаза клони към нула, т.е. при $t_r \rightarrow \infty$. Това означава, че ρ_a е в същност плътността на ядрото на частицата. Ние обаче приемаме, че ядрото на частиците е твърдо, с плътността на земните породи. Ето защо, за да изчислим радиуса на най-фините аерозолни частици, приехме за средна стойност на плътността на веществото им да бъде стойността $\rho_a = 4 \times 10^3$ kg/m³. Получените резултати са представени в таблица 3.

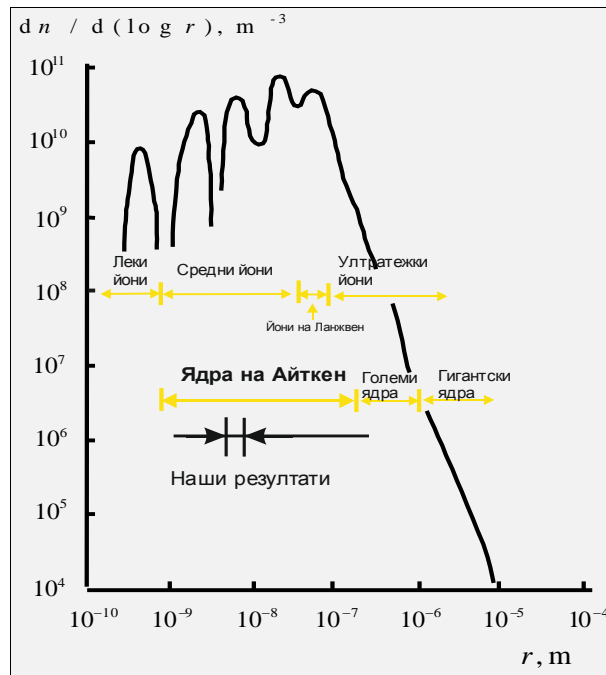
Таблица 3. Радиус r на най-фините аерозолни частици

Аерозол	А-тип	В-тип	АВ-тип
дим от цигари	Образец № 17	Образец № 7	Образец № 12
$r, 10^{-9}$ m	6.85	6.75	6.58

Както се вижда от таблици 2 и 3, стойностите на m_a и r на най-фините частици за трите вида аерозоли са близки помежду си. Поради този факт и поради физическия смисъл на въведената величина $\alpha(\bar{N})$, (стойностите ѝ се определят от пресечните точки на правите линии с ординатната ос на експериментално получени зависимости и характеризира най-фините частици, останали при еволюцията на аерозола), то ние допускаме, че тези частици са *ядрата на кондензация*. В [2] такива ядра

са цитирани като ядра на Айткен. Те са с неорганичен произход, което и ни даде допълнително основание да приемем, че ρ_a е равно на средната плътност на Земята.

На фигура 13 е дадено разпределението по размери на ядрата на кондензация, представено в [2]. С плътни линии е фиксирана областта на получените размери на най-фините частици на изследваните от нас аерозоли, при направеното предположение за ρ_a . Както се вижда, тази област се включва в областта на ядрата на Айткен.



Фигура 13. Разпределение по размери на различните видове ядра на кондензация. Определена е (с плътни линии) и областта на получените от нас размери на най-фините частици на изследваните аерозоли. Те попадат в областта на ядрата на Айткен.

В Глава 5 е направено сравнение между динамичните вискозитети на аерозолите (η) и въздуха (η_0). Сравнението показва, че те са почти еднакви, т.е. $\eta \approx \eta_0 = 1.80 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$. Това ни дава основание да модифицираме формула (1), като представим плътността ρ на аерозолната фаза във вида $\rho = \eta/\nu$ и заменим η с η_0 , в резултат на което се получава

$$\rho = \frac{\eta}{\nu} = -\frac{1}{b} \frac{\Delta H}{\bar{H}} \frac{\eta_0}{\Delta t}, \quad (5)$$

където $b = \pi r^4 g / 8 \ell S$ ($2r$ – диаметър на изходната тръба, ℓ – дължина на изходната тръба, g – земното ускорение, S – сечение на съда), ΔH – разстоянието между две съседни нива, намиращи се на разстояние \bar{H} от

изходната тръба, η – динамичният вискозитет на аерозолната система, Δt – времето за изтичане на обем от аерозола $\Delta V = S \Delta H$. Знакът във формула (5) е отрицателен поради това, че $\Delta H < 0$.

Формула (5) дава възможност да се определи масовата плътност на аерозолната фаза ρ , след измерване на Δt и \bar{H} . То се извършва с помощта на устройствата, описани в Глава 3.

В таблица 4 са представени стойностите на масовата плътност на аерозолната фаза на няколко вида аерозоли, получени по изложената методика. На 9-ти ред сме дали за сравнение и плътността на въздуха при 20 °С и нормално атмосферно налягане (таблични данни [11]).

Таблица 4. Стойности на масовата плътност на аерозолната фаза на няколко вида аерозоли, получени по изложената методика

№	Вид аерозол	$\rho, 10^{-3} \text{ kg/m}^3$
1	дим от цигара (образец № 7)	36 ± 2
2	дим от цигара (образец № 1)	38.5 ± 1.5
3	пари от парафин	46.6 ± 1.4
4	пари от глицерин	22 ± 3
5	пари от амониев хлорид	13.5 ± 0.6
6	пари от колофон	20 ± 2
7	маскировачен дим ДМ-11, бял	33.9 ± 1.4
8	маскировачен дим РДГ-2, червен	15 ± 2
9	въздух, при 20 °С	1290

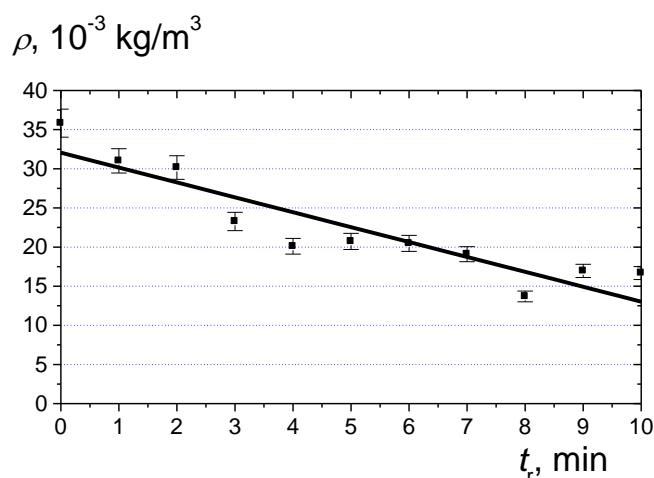
От приведените резултати се вижда, че за аерозолите с ограничен обем масовата плътност на аерозолната им фаза е около два порядъка по-малка от тази на въздуха.

Ще припомним, че при измерване на кинематичния вискозитет за същите аеродисперсни системи получихме до два порядъка по-големи стойности, отколкото тази на въздуха (при 20 °С). Този факт се съгласува с приведенния по-горе резултат, тъй като $\nu = \eta_0 / \rho$.

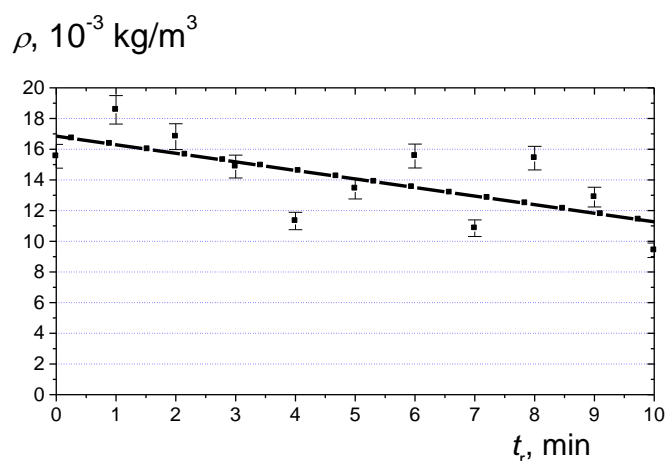
В Параграф 6.2 е показано как изложеният в предишния раздел метод се прилага и за изследване на еволюцията на аерозолни системи с ограничен обем. За тази цел, преди провеждането на експеримента по определянето на масовата плътност, аерозолът се оставя известно време t_r да престои в измервателната камера. Проведена е серия от експерименти с времена на задържане от 0 до 10 min, през 1 min.

Изследвано е изменението на средната масова плътност на аерозолните фази на В-тип аерозол (образец № 7, фигура 14) и на А-тип аерозол (образец № 17, фигура 15), като функция на времето на

задържане t_r . Всяка точка от графиките отговаря на дадено време на задържане и се определя на базата на 21 стойности. На същите фигури са представени и апроксимациите с прави линии (плътните линии). Вижда се, че точките са сравнително близко до апроксимиращите прави. Това ни дава основание да приемем зависимостите за приблизително линейни, с реални флуктуации на плътностите, надхвърлящи съответните средноквадратични грешки. Началната плътност на аерозолната фаза на образец № 17 е два пъти по-малка от тази на образец № 7. Тези стойности се получават когато $t_r = 0$ и са характерен параметър за различните аеродисперсни системи.

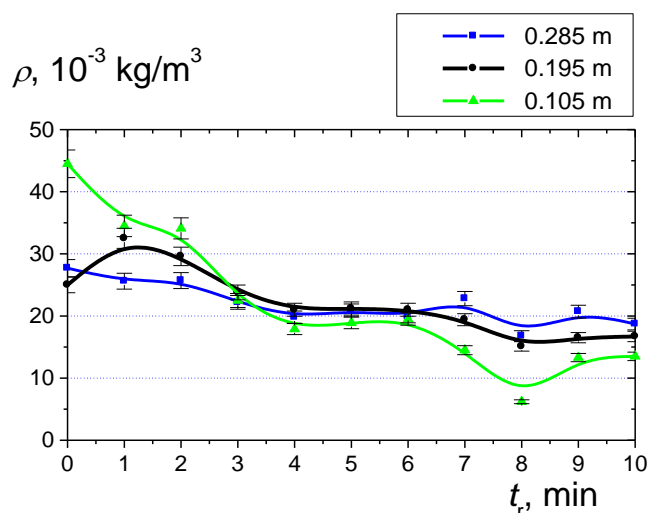


Фигура 14. Зависимост на масова плътност на аерозолната фаза на В-тип аерозол от времето на задържане t_r .



Фигура 15. Зависимост на масовата плътност на аерозолната фаза на А-тип аерозол от времето на задържане t_r .

Изследвани са измененията на средната масова плътност на три различни обема на аерозолната фаза на В-тип аерозол (образец № 7), като функция на времето на задържане t_r – фигура 16. Височините на аерозолната граница спрямо изходната тръба се приемат като мярка за обема на аерозола. Резултатите са твърде близки помежду си, което показва, че аерозол с различни обеми (в случая В-тип) еволюира практически по еднакъв начин.



Фигура 16. Зависимост на масовата плътност на В-тип аерозол при три различни обема от времето на задържане t_r .

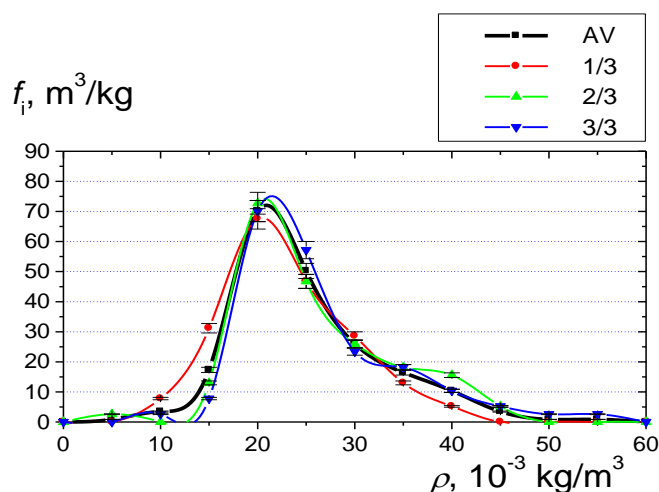
В Параграф 6.3 е представено характеризирание на аеродисперсни системи с ограничен обем посредством спектрите на състоянието. Изменението на масовата плътност на аерозолна система, в зависимост от времето на задържане t_r , и при различни височини от дъното на съда, може да се характеризира чрез функцията на разпределение по плътност, която се получава по формулата

$$f_i = \frac{W_i}{\Delta\rho_i} = \frac{N_i}{\sum N_i} \frac{1}{\Delta\rho_i}, \quad (6)$$

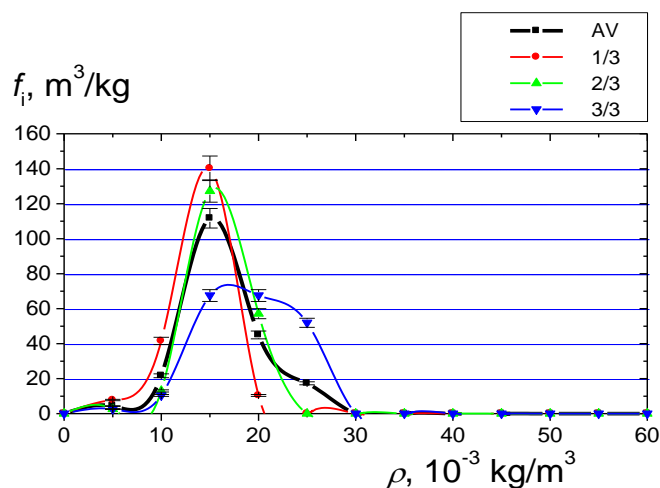
където N_i е броят на стойностите на ρ в интервала $\Delta\rho_i$, $\sum N_i$ е общата сума на стойностите. $\Delta\rho_i = \Delta\rho = \text{const}$ са стъпките в изменението на плътността, която е константа в нашия експеримент и равна на 5×10^{-3} kg/m 3 . Тази функция е наречена от нас *спектър на състоянието на аерозолна система*. Тя представлява една обобщена характеристика на аерозолната система, съдържаща масива от всички стойности на плътността на аерозолната фаза. Те са получени по време на нейната времева еволюция и при различни височини на горното ниво спрямо дъното на съда.

Изследвано е влиянието на технологията за производство на цигарени изделия върху спектъра на състоянието на аерозола, получен след изгарянето им. На фигура 17 е показан спектърът на състоянието на В-тип аерозол (образец № 7). С плътната линия (AV) е представен осредненият спектър от целия масив (231 стойности). С димът от една цигара може три пъти да се напълни измервателната камера. Ето защо цигарата е разделена условно на три части. Със зависимост 1 е показан спектърът на дима, получен от началото на цигарата; съответно със зависимост 3 – от края на цигарата (най-близката част до филтъра). Отместването на спектрите на отделните третинки е незначително. Това е доказателство за лошото филтриращо качество на тютюна в този вид цигари (едро смлян, слабо утъпкан и пр.).

На фигура 18 са показани аналогични спектри, но за А-тип аерозол (образец № 17). Отместването на спектрите на отделните третинки (зависимости 1–3) е очевидно. В отличие от предходния случай максимумът в разпределението е при по-малка плътност на аерозолната фаза, а и самият пик е два пъти по-голям.

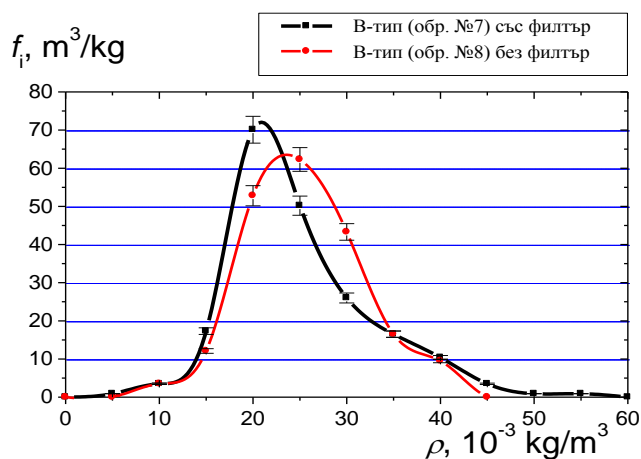


Фигура 17. Спектри на състоянието на В-тип аерозол: AV– осреднен спектър, 1–3 – спектри на състоянието на отделните третинки на цигарата.



Фигура 18. Спектри на състоянието на А-тип аерозол: AV – осреднен спектр, 1–3 – спектри на състоянието на отделните третинки на цигарата.

Изследвани са филтрите на цигарени изделия, посредством спектъра на състоянието на аерозола, получен след изгарянето им. На фигура 19 са показани този тип спектри за В-тип аерозол (със филтър – образец № 7, без филтър – образец № 8). Отсъствието на филтър води до увеличаване на дисперсността и масовата плътност на аерозолната фаза, което личи от нарастването на полуширината, намаляването на максималната стойност и отместването на кривата на спектъра надясно (в посока на по-голямата плътност).

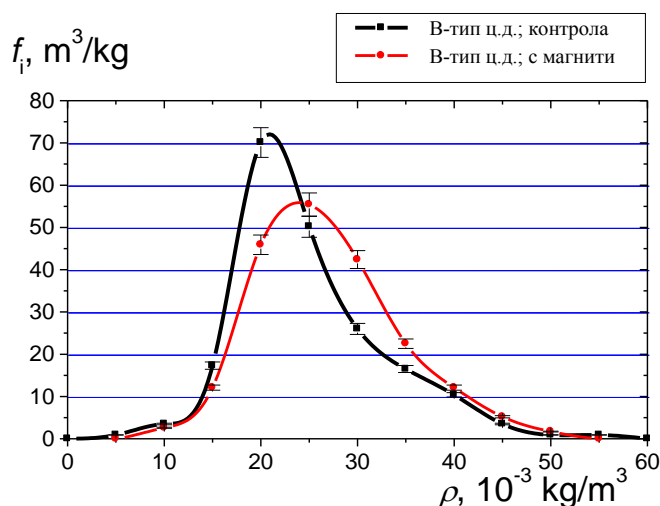


Фигура 19. Спектри на състоянието на В-тип аерозол – с филтър и без филтър.

Изследвано е влиянието на електрични и магнитни полета върху аерозолни системи. Те се основават на наличието на статични заряди в аерозолните частици, породени от различни механизми. Разгледани са подробно от П. Райст [12]. Той свързва механизма на образуване на статичен заряд в аерозолните частици със залавянето от тях на йони от въздуха. Това се дължи на факта, че масовата плътност на аерозолната фаза е много по-малка от масата на въздуха, запълващ същия обем. Този факт беше потвърден и в наши предходни работи [А3, В3].

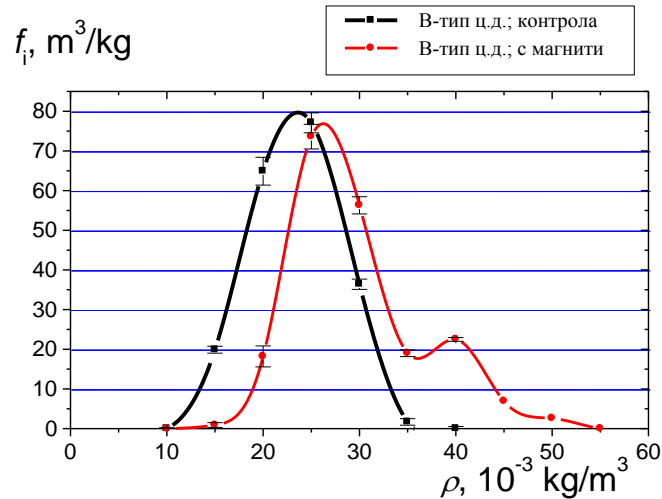
Трябва да отбележим, че в литературата не бяха открити данни за влиянието на магнитни полета върху аерозолни системи. Такова влияние не би трябвало да се очаква, освен ако аерозолните системи не са от фино разпрашени феромагнитни материали. Проведените от нас експерименти са само с цигарен дим. Зарядът на една частица е от порядъка на елементарния електричен заряд е [12, таблица 10.5]. Поради относително голямата маса на разглежданите аерозолни частици спрямо притежавания заряд предполагаем, че действието на Лоренцовата сила върху движещите се с малка скорост частици е пренебрежимо слабо. В този смисъл представените от нас резултати за влиянието на магнитни полета върху аерозолни системи (цигарен дим) са неочаквани, тъй като аерозолните частици, които изследваме, по същество са диамагнитни. Въздействието става преди напълването на аерозолната камера, чрез система от магнити.

На фигура 20 са показани спектрите на състоянието на В-тип аерозол без въздействие (образец № 7) и след въздействие (образец № 9) на магнитно поле. Отместването на спектъра е надясно, в посока на нарастване на масовата плътност, като нараства и дисперсията.



Фигура 20. Спектри на състоянието на В-тип аерозол без въздействие (контрола) и след въздействие на магнитно поле.

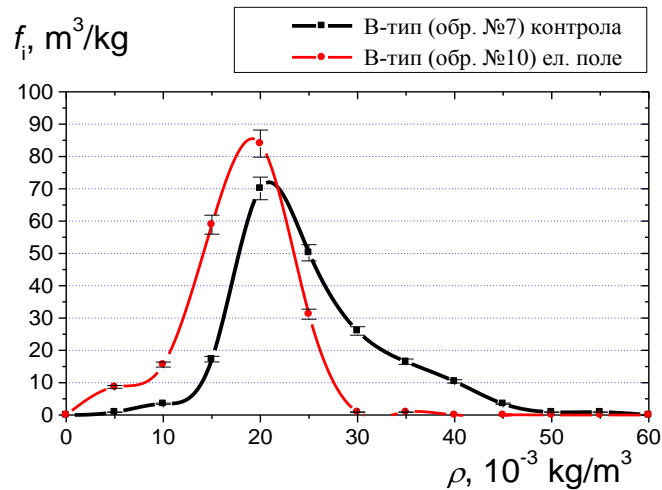
На фигура 21 са показани подобни зависимости, но за друга В-тип аерозолна система без въздействие (образец № 1) и след въздействие (образец № 3) на магнитно поле. Отместването на спектъра също е надясно, в посока на нарастване на масовата плътност. Дисперсията също нараства, т.е. тенденцията се запазва.



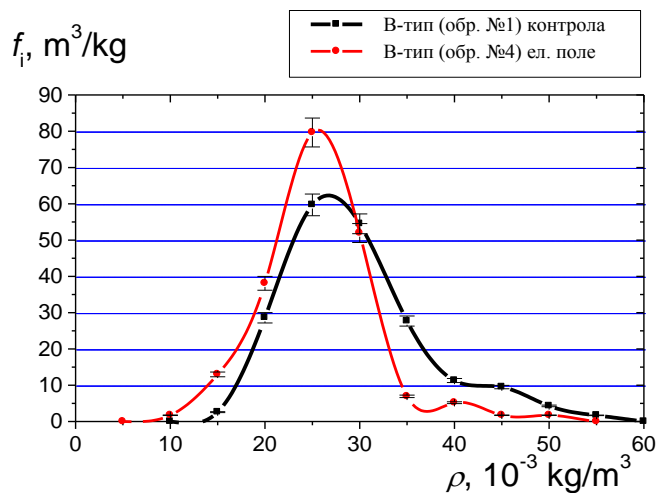
Фигура 21. Спектри на състоянието на друг В-тип аерозол без въздействие и след въздействие на магнитно поле.

Изследвано е влиянието на електрични полета върху аерозолната система. Обогащаването на аерозола с йони става преди напълването на аерозолната камера, при преминаването му през електрическа камера. Тя се състои от два паралелни електрода – плосък С (с отрицателен потенциал) и гребеновиден А (с положителен потенциал). На тях се подава напрежение 2 kV. Възникналият коронен разряд обогаща преминалия аерозол с йони. На фигура 22 са показани спектрите на състоянието на В-тип аерозолна система без въздействие (образец № 7) и след въздействие (образец № 10) на електрично поле. Отместването на спектъра (в отличие от въздействието с магнитно поле) е наляво, в посока на намаляване на масовата плътност, дисперсията също намалява.

На фигура 23 са показани подобни зависимости, но за друга В-тип аерозолна система без въздействие (образец № 1) и след въздействие (образец № 4) с електрично поле. Видът на кривите е малко по-различен, но тенденцията се запазва – спектърът е отместен наляво (съответно намалява средната стойност), дисперсията също намалява.



Фигура 22. Спектри на състоянието на В-тип аерозолна система без въздействие и след въздействие на електрично поле.



Фигура 23. Спектри на състоянието на друга В-тип аерозолна система без въздействие и след въздействие на електрично поле.

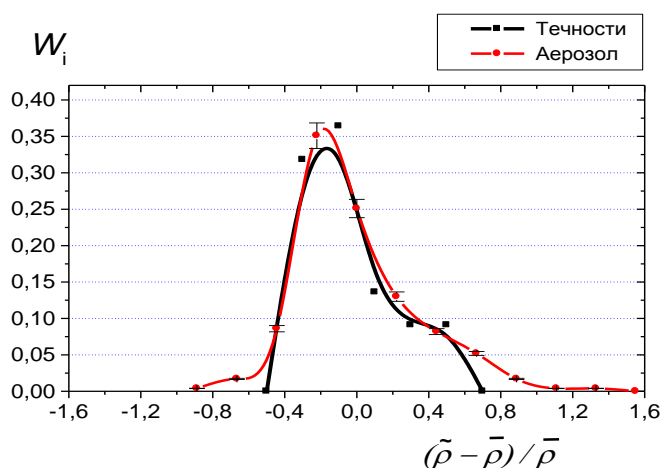
Може да се направи извода, че полученото от нас изменение на разпределението по плътност се дължи на окрупняването на аерозолните частици и по-бързата им седиментация, вследствие на рекомбинацията на положителните и отрицателните им заряди. Трябва да се вземе предвид и влиянието на електрическата камера като електрофилтър (отделяне на заредените частици върху полюсите с противоположен на съдържащият се в тях заряд) при преминаването на аерозолът през нея. За сега не предлагаме количествена оценка на двата процеса, а само представяме възможностите на метода.

Направено е сравнение на разпределението по плътност на аеродисперсните системи с ограничен обем с това на течностите:

▪ За аерозолна система избрахме система от В-тип (образец № 7). Общият брой на стойностите от целия масив на получените плътности, за време на задържане от 0 до 10 min, е $\sum N_i = 231$ броя. Най-малката получена стойност е $4.3 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, а най-голямата – $50.6 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Интервалът от 0 до $60 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ бе разделен на 12 еднакви подинтервала с големина $\Delta\rho_i = 5 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Намерихме броя на стойностите N_i , влизащи във всеки подинтервал на плътността със средна стойност $\tilde{\rho}$.

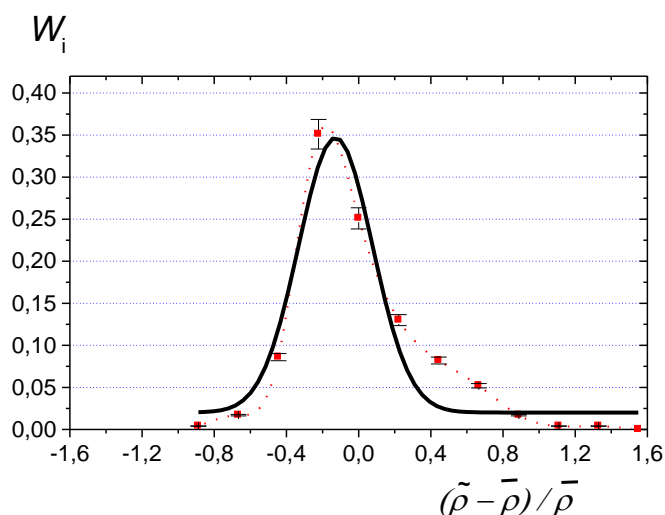
▪ За течности (за настоящия числен експеримент) използвахме таблични данни за плътността на течности, цитирани в [13]. За статистическата ни обработка използвахме $\sum N_i = 22$ броя. Най-малката стойност е на пентан ($0.626 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$), а най-голямата е на тетрахлорметан ($1.590 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$). Двете стойности, останали извън статистическата ни обработка, са на бромформа и брома. Интервалът $(0.4-1.8) \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ бе разделен на 7 подинтервала с равни големини $0.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.

По плътност аерозолите с ограничен обем и течностите се различават на около 5 порядъка. За да направим сравнение между тях на разпределението по плътност постъпихме по следния начин: Намерихме средната стойност на плътността $\bar{\rho}$ и вероятността $W_i = N_i / \sum N_i$ за попадане във всеки подинтервал от ляво и от дясно на средната плътност. Съвместихме на обща графика зависимостите на W_i от безразмерната величина $(\tilde{\rho} - \bar{\rho}) / \bar{\rho}$. На фигура 24 е показана получената от нас зависимост.



Фигура 24. Вероятностно разпределение на плътността W_i на аерозоли на течности спрямо средната им стойност.

На базата на гореизложеното е направено заключението за В-тип аерозол (образец № 7), че има разпределение на масовата плътност много близко до това на течностите. По форма то е близко до Гаусовото, с преобладаване на стойностите, които са по-големи от средната – фигура 25.



Фигура 25. Вероятностно разпределение на плътността W_i на В-тип аерозол спрямо средната му стойност (квадрати и прекъсната линия). Сравнение с Гаусовото разпределение (плътна линия).

Аналогичен резултат, но с малко по-голяма дисперсия, е получен и с масива от всички измерени резултати – както за дима от различните марки цигари (без и след въздействие, при $t_r = 0-10$ min), така и за други димове (пари от амониев хлорид, парафин и др., при $t_r = 1$ min). От направеното сравнение между стойностите на масовата плътност и съответните разпределения по плътност на изследваните аеродисперсни системи с ограничен обем с тези на течностите *може да се направи важен извод*: Въпреки различието по средна стойност на масовата плътност от пет порядъка, във вероятностното разпределение на масовата плътност W_i , по отношение на отклонението от средната стойност изразено чрез безразмерната величина $(\tilde{\rho} - \bar{\rho}) / \bar{\rho}$, съществуват общи признаци.

Ето три от общите признаци между разгледаните разпределения по плътност на изследваните аеродисперсни системи с ограничен обем и тези на течностите:

1. И в двете разпределения съществуват граници на минималната и максималната плътност, които могат да бъдат измерени.

2. Тези разпределения са близки по форма, като максимумите практически съвпадат със съответните средни стойности.

3. Разпределението по масова плътност на аерозолната фаза при аеродисперсните системи е твърде близко до Гаусовото разпределение. Това показва, че аеродисперсните системи с ограничен обем за цялото си време на еволюция, за което време проявяват допълнително хидростатично налягане, притежават *предпочитана* (най-вероятна) стойност на масовата плътност, която съвпада със средната.

Този резултат допълва смисъла на използвания термин “квазитечно състояние” за аеродисперсните системи с ограничен обем.

Основни резултати и приноси в дисертацията

1. Разработен е метод за определяне на кинематичния вискозитет на аеродисперсни системи с ограничен обем, посредством измерване на времето на изтичане на аерозола, под действие на допълнителното налягане на дисперсната фаза и прилагане закона на Поазьой [A2, B1, B2].

2. Конструирано е устройство, на базата на метода от т. 1, за измерване на кинематичния вискозитет на аеродисперсни системи с ограничен обем, чрез определяне на понижението на горната аерозолна граница посредством система от фотодатчици, регистриращи разсеяната лазерна светлина в перпендикулярна посока на лазерен лъч, минаващ по оста на цилиндрична измервателна камера. Разработена е оптоелектронна схема за автоматизиране на измервателния процес, свързана с персонален компютър за обработка, визуализация и съхранение на резултатите [A2, B1, B2].

3. Експериментално са измерени стойностите на кинематичния вискозитет на различни аеродисперсни системи с ограничен обем в процеса на тяхната еволюция [A2, B2].

4. Направена е оценка на масата и размера на най-фината фракция в аеродисперсни системи с ограничен обем, посредством екстраполация на получените експериментални резултати за кинематичния вискозитет в случая, когато времето на еволюция на системата клони към безкрайност. Установено е, че тези най-фини частици, останали при еволюцията на аерозола, са ядра на кондензация. Те са известни в литературата като ядра на Айткен [A1, B5].

5. Разработен е метод за определяне на масовата плътност на аеродисперсни системи с ограничен обем, модификация на онзи за определяне на кинематичния вискозитет (от точка 1). Чрез серия от експериментални изследвания на различни аеродисперсни системи са

измерени стойности на масовата плътност на аерозолната фаза по-ниски от тази на въздуха [A3, B3].

6. За характеризирание на еволюцията на аеродисперсни системи с ограничен обем е въведена функция на разпределение по масова плътност на аерозолната фаза, наречена в дисертацията “*спектър на състоянието на аерозолната система*”. Експериментално е определено изменението на последния, при въздействие с електрични и магнитни полета, осъществено при формиране на системата. Направено е сравнение на вероятностното разпределение на средните стойности на плътността за течности (по таблични данни) и за аеродисперсни системи с ограничен обем (по получените експериментални данни). За последните е установено, че това разпределение е твърде близко до Гаусовото [A4, B4].

Списък на публикациите, включени в дисертацията

А. Публикации в научни списания

- [A1] K. Damov, A. Antonov, Assessment of the most refined fraction in aerosol systems with limited volume via measuring their cinematic viscosity, *Compt. rend. Acad. bulg. Sci.* **62** (2009) 323–328
- [A2] K. Damov, A. Antonov, Investigating the kinematic viscosity of aerosol systems in quasi-liquid state, *Compt. rend. Acad. bulg. Sci.* **48** (1995) 29–32
- [A3] K. Damov, A. Antonov, Determining the Mass Density of Aerosol System in limited Volume via Laser Light Scattering, *J. Appl. Electromagnetism* **9** (2007) 57–64
- [A4] K. Damov, A. Antonov, Investigation of Aerosol System evolution in limited Volume via Laser Light Scattering, *J. Appl. Electromagnetism* **10** (2008) 45–54
- [A5] K. Damov, A. Antonov, Investigating the influence of electric and magnetic fields on the evolution of aerosol systems in limited volume via laser light, *J. Appl. Electromagnetism* **11** (2009) 9–16
- [A6] K. S. Damov, I. P. Jordanov, A. S. Antonov, M. T. Iliev, Characterization of Aerodispersed Systems with Increased Concentration According to the Kinematic Viscosity and Mass Density of their Aerosol Phase, *Bulg. Chem. Communications* (2017) (in print)

В. Публикации в материали на научни конференции и сборници, представени в пълен текст

- [B1] K. Damov, M. Iliev, *J. Phys.: Conference Series* **682**, 012007 (2016)
- [B2] К. Дамов, Метод и устройство за определяне на динамичния вискозитет на аерозоли, *Сборник от изследвания на млади научни работници* (Изд. на ЮЗУ-Благоевград, Благоевград, 1991) 132–139
- [B3] K. Damov, A. Antonov, Method of Measuring Density Distribution in Model Aerosol System, *Proc. Int. Sci. Conf.* (8–11 June 2005) (South-West University “Neofit Rilsky”, Blagoevgrad) **1**, 346–352 (2005)
- [B4] K. Damov, A. Antonov, Investigation of Aerosol System Evolution in Limited Volume via Laser Light Scattering, *Proc. Int. Sci. Conf.* (6–10 June 2007) (South-West University “Neofit Rilsky”, Blagoevgrad) **2**, 117–123 (2007)
- [B5] K. Damov, A. Antonov, Assessment of the most refined fraction in aerosol systems with limited volume via measuring their cinematic viscosity, *Proc. Int. Sci. Conf.* (6–10 June 2009) (South-West University “Neofit Rilsky”, Blagoevgrad) **2**, 124–130 (2009)

С. Доклади на научни конференции, представени като постери или отпечатани като абстракти

- [C1] А. Антонов, К. Дамов, Метод и устройство за определяне на динамичния вискозитет на тютюнев дим, *IV Национален симпозиум “Физика – селско стопанско производство”* (София 11–14 ноември 1991), с. 15
- [C2] К. Дамов, А. Антонов, Окачествяване на тютюна и тютюневите изделия, посредством измерване и анализиране на динамичния вискозитет на тютюневия дим, *IV Национален симпозиум “Физика – селско стопанско производство”* (София 11–14 ноември 1991), с. 16
- [C3] K. Damov, A. Antonov, On the measurement of kinematic viscosity of aerosol systems, *9th International Conference on Surface and Colloid Science* (Sofia 6–12 July 1997), p. 79

D. Други

[D1] Заявка на патент за изобретение към Българското патентно ведомство: К. Дамов, А. Антонов, М. Илиев, Й. Маринов, *Метод и устройството за определяне на кинематичния вискозитет и масовата плътност на аерозоли*, рег. No 112345/26.07.2016

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Н. Фукс, *Механика аэрозолей* (АН СССР, Москва, 1955)
- [2] Х. Грин, В. Лейн, *Аэрозоли – пыли, дымы и туманы* (Химия, Ленинград, 1969)
- [3] O. Preining and E. J. Davis (Eds.) *History of Aerosol Science* (Verlag der Osterreichischen Akademie der Wissenschaften, Vienna, Austria, 2000)
- [4] R. Flagan, Book review: *History of Aerosol Science*, *J. Aerosol. Sci.* **32**, 1131 (2001)
- [5] А. Антонов, А. Петрова, Л. Юскеселиева, *Доклады 12-ой Всесоюзной конференции по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем*, (Одесса 1976) с. 9
- [6] А. Антонов, А. Петрова, Л. Юскеселиева, *Доклады на VII Национална конференция по физика* (Видин 1976) с. 190
- [7] А. Антонов, А. Петрова, Л. Юскеселиева, *Доклады на II Национална конференция “Физика – производство”* (Казанлък 1977) **2**, с. 798
- [8] А. Антонов, А. Петрова, Л. Юскеселиева, *Известия АН СССР, Физика атмосферы и океана* **XIV**, 808 (1978)
- [9] А. Антонов, А. Петрова, Л. Юскеселиева, *Физика аэродисперсных Систем* **18**, 37 (1978)
- [10] V. Epstein, *Z. Phys.* **54**, 537 (1929)
- [11] F. White, *Fluid Mechanics*, 4th edition (McGraw-Hill, London, 1998)
- [12] П. Райст, *Аэрозоли – введение в теорию* (Мир, Москва, 1987)
- [13] Д. Христозов, И. Младенов, С. Арменски, Н. Андреев, М. Минев, Х. Манев, *Лабораторен практикум по физика* (Наука и изкуство, София, 1990)

П р и л о ж е н и я:

Приложение П1. Съдържа фотографии на аеродисперсни системи с ограничен обем, с природен и антропогенен произход (3 фигури).

Приложение П2. Представен е запис на резултатите от пълен експеримент за измерване на кинематичния вискозитет на аеродисперсна система с ограничен обем (1 таблица).

Приложение П3. Представен е запис на резултатите от пълен експеримент за измерване на масовата плътност на аеродисперсна система с ограничен обем (1 таблица).

Приложение П4. Направена е класификация на изследваните видове цигари по тип според стойностите на кинематичния вискозитет на дима им. Представени са данни за масата на катраните и никотина на изследваните видове цигари.

Приложение П5. Представен е запис на резултатите от пълен експеримент за измерване на кинематичния вискозитет и масовата плътност на аеродисперсна система с ограничен обем с Установка 2.