

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ  
НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО МЕТЕОРОЛОГИЯ И ХИДРОЛОГИЯ

---

Димитър Живков Николов

ОБЛЕДЯВАНЕ НА ТЕХНИЧЕСКИ СЪОРЪЖЕНИЯ В  
БЪЛГАРИЯ И ДРУГИ ЕВРОПЕЙСКИ СТРАНИ

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация

за присъждане на образователната и научна степен „доктор”  
в област на висше образование

4. Природни науки, математика и информатика,  
професионално направление 4.1. Физически науки (Метеорология)

Научен ръководител:  
доц. д-р Емил Моралийски

София  
2014

Дисертацията е с обем 186 страници. Състои се от: увод; пет глави, които съдържат 45 таблици и 104 фигури; публикации, свързани с дисертационния труд и списък с цитираната литература, включващ 174 заглавия, от които 45 на кирилица и 129 на латиница. Номерата на таблиците и фигурите в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

Дисертационният труд е обсъден и предложен за защита на разширен научен семинар на департамент „Метеорология“ на НИМХ-БАН, проведен на 18.07.2014 г.

Докторантът работи в департамент „Метеорология“, секция „Климатология и метеорологични база данни“ на НИМХ-БАН, София.

**Състав на научното жури:**

доц. д-р Анелия Гочева, НИМХ – БАН

доц. д-р Емил Моралийски, НИМХ – БАН

проф. д-р Георги Благоев, УАСГ

доц. д-р Румяна Мицева, СУ

доц. д-р Елисавета Пенева, СУ

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 28.11.2014 г. от 14 часа в заседателната зала на Учебния център на НИМХ, гр. София.

Материалите по защитата ще са на разположение на интересуващите се в канцеларията на НИМХ-БАН и на интернет страницата на Института.

# СЪДЪРЖАНИЕ

<b>Обща характеристика на дисертационното изследване</b>	<b>3</b>
Актуалност на изследването	3
Цел и задачи на работата	5
Използвани данни и методи	5
Приложимост и полезност	6
Апробация на работата	7
Обем и структура на дисертацията	7
<b>Кратко изложение на дисертационния труд</b>	<b>7</b>
Глава I. Физически основи на процеса на обледяване – теоретичен и литературен обзор	8
Глава II. Практически методи за количествена оценка на натоварването от обледяване	12
Глава III. Климатологични изследвания на обледяването на различни места в Европа	15
Глава IV. Анализ и класификация на синоптичните обстановки при обледяване	29
Глава V. Анализ на отделни случаи и практическо приложение на методите за количествена оценка на обледяването на различни места в Европа	31
<b>Заклучение</b>	<b>40</b>
<b>Приноси</b>	<b>44</b>
<b>Списък на публикации, свързани с дисертационния труд</b>	<b>45</b>
Публикации в научно списание	45
Доклади, публикувани в пълен текст в сборници на конференции	45
Доклади с публикувани разширени резюмета в сборници на конференции	46
Непубликувани доклади от конференции и семинари	46
<b>Списък на цитираната в автореферата литература</b>	<b>47</b>
<b>Благодарности</b>	<b>49</b>

## **Обща характеристика на дисертационното изследване**

### **Актуалност на изследването**

Обледяването може да се прояви като зърнест скреж, поледица, мокър сняг, кристален скреж или комбинация от тях, от които единствено кристалният скреж не представлява риск. Обледяването е включено в списъка на Световната метеорологична организация (СМО) като едно от опасните и особено опасните метеорологични явления. То влияе директно и сериозно върху различни сектори от човешката дейност като производството и преноса на електрическа енергия, телекомуникацията, наземния, въздушния и морския транспорт и др.

Основните ефекти от обледяването на една конструкция са нарастване на преките вертикални натоварвания и на аеродинамичното ѝ съпротивление. Ако обледяването е силно и продължително, може да причини сериозни щети, така че целият икономически и социален живот в засегнатия район да бъде сериозно затруднен и дори да застраши живота на хората. Една малка част от примерите за такива сурови приземни обледявания са опустошителните ледени бури в североизточните райони на Америка и Югоизточна Канада през януари 1998 и 2014 г., аварийните обледявания в България през януари 1969, 1971 и 1987 г., февруари 1979, 1986 и 1998 г., март 1969 и 1984 г., ноември 1988 и 1998 г. и декември 1995 и 1996 г., както и тежкият мокър сняг през зимата на 2011/2012 г., силната снежна буря в Германия от 2005 г. и екстремният преохладен валеж в Словения и Хърватия през февруари 2014 г., почти всички от които предизвикали обявяването на бедствено положение.

Най-засегнати от обледяването са електропреносните мрежи, тъй като те покриват най-големи площи – съизмерими с площите на дадената страна, и съответно са най-изложени на метеорологични въздействия. Обледяването влияе силно и на бурноразвиващото се в последните години производство на електричество от силата на вятъра, като периодите с продължителни обледяващи процеси намаляват съществено пълноценното използване на енергийния потенциал на вятъра. Явлението е един от метеорологичните рискове, който трябва да бъде оценен в термини на обезпеченост и период на повторение и при проектирането и експлоатацията на атомни електроцентрали

според СМО. Други чувствителни към обледяването технически конструкции са: телекомуникационни мачти, ретранслаторни кули, антени и антенни съоръжения, лифтове и въжени линии, въздушните електрически линии на железопътния и пътните настилки на шосейния транспорт.

Във всеки един от изброените икономически сектори има нужда от надеждна информация за това явление, която може да се раздели основно на следните типове: климатологична информация за явлението; нормативна информация за очаквани натоварвания от лед с различна обезпеченост; краткосрочна информация за очакваната поява на явлението и неговата суровост. За производството на електрическа енергия от ВЕИ са важни първият и последният тип информация, за авиацията най-вече последният, а нормативната е задължителна при строителството и експлоатацията на различни конструкции и съоръжения.

Нуждата от специализирани регулярни измервания на приземното обледяване, основно за климатологични цели и прогноза на явлението, доведе до стартирането през 2004 г. на европейски проект 727 “Измерване и прогноза на атмосферното обледяване” по програма COST, последван от множество дългосрочни национални дейности, най-вече в сектора на производството и преноса на електроенергия, включително и от възобновяеми източници. Приетият през 2007 г. и в България международен стандарт ISO 12494 “Атмосферно обледяване на конструкции” разглежда и препоръчва съвременните методи за оценка на нормативното натоварване от обледяване, което вече се определя с период на повторение веднъж на 50 години.

Предмет на изследване в настоящата дисертация е приземното обледяване. Основни публикации по тематиката със значителен принос в развитието на изследванията по този проблем са тези на Ленгмюр и Блоджет [1], Мазин [2], Лъдлъм [3, 4], Месинджер [5], Маклин [6], Маклин и Пайне [7], Вакахама и колектив [8], Колбек [9], Соломатина [10], Бучински [11], Раевски [12], Руднева [13], Глухов [14], Заварина [15], Лозовски [16], Макконен [17-25], Финстадт [26-28], Джонс [29].

## **Цел и задачи на работата**

Целта на дисертацията е изследване и оценка на приземното обледяване в различни европейски райони, т.е. насочена е основно към осигуряването на първите два типа информация (климатологична и нормативна) за това явление. Целта е постигната с изпълнението на следните задачи:

1. Подробно проучване на развитието и на съвременното състояние на научните изследвания по въпроса;
2. Изследване на режима на обледяване в различни европейски райони и определяне на основните му характеристики;
3. Сравняване на метеорологичните условия при обледяване в различни европейски райони;
4. Изследване и типизация на синоптичните ситуации при обледяване от преохладени валежи в България;
5. Изследване на архивни експериментални данни при заскрежаване на цилиндри с различни диаметри в района на Черни връх;
6. Изследване и сравняване на различни практически методи за оценка на обледяването;
7. Използване на практическите методи в конкретни приложения и за цялостно райониране на територията на България по натоварване от обледяване.

## **Използвани данни и методи**

В дисертацията са използвани два вида данни – стандартните метеорологични наблюдения за различен период от време и различен брой станции (30 години основен период за изследването в България, тричасови данни от 27 синоптични и ежедневни данни от 10 климатични станции; 20 г. за мокрия сняг в Германия, ежечасни данни от 70 станции и 12 г. за сравнителното изследване между Словакия и България, тричасови данни от 4 синоптични станции), както и специализирани наблюдения и измервания в съчетание със стандартни метеорологични данни в отделни случаи на обледяване. Това включва петгодишен период в района на Черни връх, двугодишен период в две станции в Австрия и Чехия и 27-годишен наблюдателен материал за

обледяване в случаи на аварии по електропреносната мрежа в Югоизточна България и Родопите. Синоптичният анализ е направен за 30-годишен период.

Използваните методи включват статистически анализ и статистическа екстраполация, изследване и оценка на модели, синоптичен анализ и типизация на синоптични обстановки.

## **Приложимост и полезност**

Получените резултати могат да намерят непосредствено приложение при следните приложни задачи:

- Количествена оценка на обледяването в различни местоположения от страната;
- Актуализация на нормативните натоварвания от обледяване и райониране на страната според стандарт ISO 12494 “Атмосферно обледяване на конструкции”.

Част от получените резултати вече са намерили пряко приложение при изготвяне на множество експертни оценки и договори за оценка на нормативното натоварване от обледяване в различни райони на страната. По-важните от тях са изброени в последния параграф на дисертацията. Три от приложенията са внедрени в практиката със съответен документ, който е приложен към документите по защитата. Това са:

- Районирането на страната по натоварване от обледяване за нуждите на НЕК през 2000 г.;
- Участие при окончателното редактиране на българската редакция на международния стандарт ISO 12494 “Атмосферно обледяване на конструкции” от Техническият комитет №56 към Българския институт по стандартизация;
- Договор с “Аурубис България” АД като ръководител и главен изпълнител за оценка на натоварването от обледяване и вятър на промишлен комин с височина 140 m в района на гр. Пирдоп.

В изследователски план резултатите могат да се използват при по-нататъшен подробен анализ на метеорологичните и синоптичните условия при обледяване в страната, оценка на тенденциите в изменението на климатичните характеристики на явлениято, разработването на прогностична схема за

обледяване и проверка и усъвършенстване на моделите за количествена му оценка.

### **Апробация на работата**

Основни идеи и резултати от работата са докладвани на: Втората европейска конференция по приложна климатология (ЕСАС) във Виена (Австрия, 1998); Четвъртата европейска конференция по приложна метеорология (ЕСАМ) в Норкьопинг (Швеция, 1999); на 26-та международна конференция по планинска метеорология (ICAM) в Инсбрук (Австрия, 2000); Петия зимен семинар на младите учени и докторанти, станция на БАН – Витоша (2002); Открития международен семинар по обледяване в София (2005); Седмата конференцията BOREAS VII в Саариселка (Финландия, 2005); конференцията Winterwind в Норкьопинг (Швеция, 2008); Заключителната конференция по проект COST 733 “Harmonisation and application of weather type information classifications in Europe” във Виена (Австрия, 2010); Десетата, Дванадесетата и Тринадесетата международна конференция по атмосферно обледяване на конструкции (10, 12, 13 International Workshop on Atmospheric Icing of Structures – IWAIS) в Бърно (Чехия, 2002), Йокохама (Япония, 2007) и Андермат (Швейцария, 2009) съответно; първата Българо – Японска конференция за научно сътрудничество и устойчиво развитие в Токио (Япония, 2013) и на редица работни срещи по проект COST 727 „Измерване и прогноза на атмосферното обледяване на конструкции” в периода 2004 – 2009 г.

### **Обем и структура на дисертацията**

Дисертацията е с обем 186 страници. Състои се от: увод; пет глави, които съдържат 45 таблици и 104 фигури; публикации, свързани с дисертационния труд; внедрявания и списък с цитираната литература, включващ 174 заглавия, от които 45 на кирилица и 129 на латиница.

### **Кратко изложение на дисертационния труд**

В увода е дадено описание на видовете обледявания, основните въздействия и социално-икономическите последици от тях. Направен е кратък исторически обзор на изследванията по обледяване и е отразено времево възникването на най-важните термини в теорията на обледяването, като



коэффициент на сблъскване, критично водно съдържание, сух и мокър режим на нарастване, параметър на Маклин, коэффициент на прилепване и коэффициент на нарастването. Отражено е развитието на тези изследвания и в България. На края на увода са формулирани целите на дисертацията.

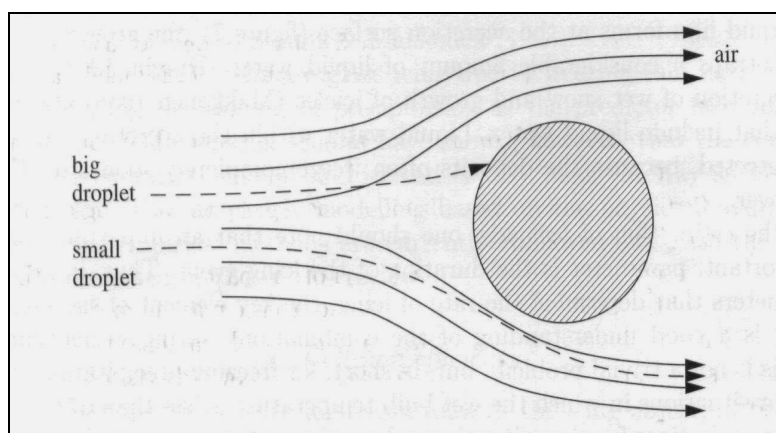
## **Глава I. Физически основи на процеса на обледяване – теоретичен и литературен обзор**

В тази глава е направен подробен теоретичен и литературен обзор на физическия процес на обледяване и неговото моделиране.

Разглеждайки отделните преохладени водни капки или мокри снежинки, може да се приеме, че обледяването протича в две основни фази, които се определят от различни физически процеси. В първата фаза решаващо е обтичането на обекта от носещия поток и отлагането на тези облачни или валежни частици, а във втората – процесите на фазов преход от течно в твърдо състояние на водата (кристализация) или сублимация (при кристален скреж), както и създаването на капилярни сили при отлагане на мокър сняг. При първия процес са важни аеродинамичните характеристики на капките и снежинките, препятствието и въздушният поток, които определят колко от тоталното течно водно съдържание, носещо се от потока, ще се отложи върху повърхността на препятствието и каква част ще я заобиколи или напусне след удар с нея. Втората фаза се обуславя предимно от термодинамичните процеси в системата от капчици и снежинки, обледяваща се повърхност и околна среда, които определят каква част от постъпващата вода ще замръзне и ще доведе до нарастване размера на обледяването и какво количество ще остане в течно състояние в отложението или ще го напусне, като изпадне от него или бъде издухана от вятъра. При мокрия сняг съществена роля във втората фаза играят и капилярните сили. Между двете фази има силна взаимовръзка. Усилването на вятъра, освен че променя аеродинамичните характеристики на потока, може да доведе и до промяна на топлинните условия на обледяващата се повърхност, като увеличи потока от преохладена вода, а появата и количеството вода в падащите снежинки променят условията за задържането им по повърхността на препятствието – сухите снежинки отскачат почти напълно. Механичното влияние на вятъра може да обруши отложението.

Течното водно съдържание във въздуха е друг важен фактор, влияещ върху интензивността на процеса, и се определя от броя на водните капки или мокрите снежинки и разпределението им по големина в единица обем. Различните по размер капки и снежинки имат, от своя страна, различни аеродинамични характеристики. Повишаването на течното водно съдържание в мокрия сняг благоприятства нарастването на отложението, но само до едно определено ниво, след което води до разрушаването му. Всички тези фактори определят не само интензивността на процеса, но и структурата на обледяването.

Интензивността на процеса на обледяване – изменението на масата на отложението за единица време – се определя на първо място от количеството водно съдържание във въздуха ( $w$ ) и от скоростта ( $V$ ) на частиците (капки или снежинки) спрямо обекта. Максималното, или тоталното, водно съдържание във въздушния поток, което би могло да се отложи за единица време на единица площ от повърхността на препятствието, перпендикулярна спрямо въздушния поток, се дава от  $wV$  – т. нар. плътност на потока вода ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ ). Тази потенциална максимална интензивност се намалява от факта, че част от капките – тези с малки размери, се отклоняват заедно с въздушната струя от препятствието и минават покрай него (фиг. 1).



**Фиг.1.** Токови линии на въздуха и траектории на капки около цилиндър (от Макконен [24])

Друг фактор, който може да намали интензивността на обледяването, са процесите на отскачане на отлагачи се частици или откъсването на вече отложени се и замръзнали капки. Появата на воден филм при трансформация на процеса от сух в мокър режим, която може да настъпи както при нарастване

на температурата на въздуха, така и при увеличаване плътността на потока, също променя значително интензивността на процеса. Освен това в този случай са възможни и загуби поради оттичане на незамръзнала вода или издухването ѝ от повърхността на обекта, когато силите на повърхностно напрежение станат по-малки от гравитацията и силата на вятъра. Следователно за точно описание на процеса на обледяване е нужно да се намерят изрази и за тези останали два фактора на редукция.

Най-актуалното представяне на уравнението за интензивността на процеса на обледяване, обобщавайки получените дотогава резултати, дава през 2000 г. Макконен [24]. Уравнението има вида:

$$I = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 w V A, \quad (3)$$

където  $\alpha_1$  е ефикасността (според стандарта ISO 12494 “Атмосферно обледяване на конструкции”) на сблъскване,  $\alpha_2$  е ефикасността на прилепване, а  $\alpha_3$  е ефикасността на нарастване. В същата работа са представени и съответните изрази за пресмятане на тези коефициенти.

По-нататък – в параграф 2.1. “Динамика на обледяването”, е разгледано теоретично движението и траекториите на обледяващи частици във въздушен поток около препятствие и извеждането на коефициента на отлагане (ефикасност на сблъсъците). Основополагащите открития по този проблем датират от 40-те години на миналия век – това са работите на Тейлор [30], Ленгмюр и Блоджет [1] и Мазин [2]. Всички тези изследвания са свързани с авиационното обледяване и имат за цел да установят колко и къде по повърхността, най-вече на крилата, ще се отложат преохладените облачни капчици, предизвикващи обледяване. Най-пълна теоретична обосновка на проблема и най-точни изчисления правят Ленгмюр – Блоджет и Мазин. За опростяване на пресмятанията Ленгмюр и Блоджет въвеждат два безразмерни параметъра –  $K$  и  $\phi$ . Подобен подход прилага и Мазин.

Лангмюр и Блоджет [1] откриват, че никакви капки не се отлагат, ако параметъра  $K$  е по-малък от  $1/8$ . При малко по-големи стойности отложението е съвсем слабо в една зона близо до линията на застой. В крайна сметка Ленгмюр и Блоджет извеждат максимален ъгъл  $\theta_M$ , зад който не може да има отлагане при дадена стойност на  $K$ , зона на докосване (захват – в

рускоезичната литература), която лежи между  $\pm \theta_M$ , и тотална ефективност на отлагането  $E_M$ , отнасяща се за съответната зона.

$$E_M = 0.466(\ln 8K)^2 \quad \text{при} \quad 0.125 < K < 1.1 \quad (12)$$

$$E_M = \frac{K}{\left(K + \frac{\pi}{2}\right)} \quad \text{за} \quad K > 1.1 \quad (13)$$

Последно Финстад и колектив [28] преизчисляват наново траекториите на капчиците, интегрирайки числено с помощта на компютър уравненията на движение и предлагат следната емпирична апроксимация за ефективността на отлагане, която вече е намерила широко използване при моделирането на обледяването:

$$\alpha_1 = A - 0.028 - C(B - 0.0454), \quad (16)$$

като параметрите А, В и С се определят по формулите:

$$\begin{aligned} A &= 1.066K - 0.00616\exp(-1.103K - 0.688) \\ B &= 3.641K - 0.498\exp(-1.497K - 0.694) \\ C &= 0.00637(\varphi - 100)0.381 \end{aligned} \quad (17)$$

В следващия параграф на тази глава (1.2. Метеорологични и аеродинамични характеристики на облаците, капките и снежинките, касаещи обледяването) се дават дефиниции за важни за обледяването параметри и се извеждат съответните формули, като тези за медианен обем диаметър или радиус (Median Volume Diameter MVD), течното водно съдържание (LWC) във въздуха, скоростите на падане на капчиците и снежинките и ефикасността на прилепване –  $\alpha_2$ . Главата продължава с параграф 1.3., в който се дефинират сухият и мокрият режим на нарастване и граничните условия между двата. Следва параграф 1.4., в който се представят топлинният баланс на процеса на обледяване, структурата и плътността на отложението, параметърът на Маклин и се извежда ефикасността на нарастването –  $\alpha_3$ . Глава I завършва с кратко описание на теоретичното моделиране на процеса на обледяване. Един добър модел за обледяване, базиран на точно математическо и физическо описание на всички участващи процеси, би позволил надеждна количествена оценка на размерите, масата и формата на отложенията. Много често това е и единствената възможност да бъде оценена застрашеността на даден обект от възможни тежки или екстремни ситуации на обледяване. От гледна точка на

определяне на възможните натоварвания са важни най-вече размерите и масата на отложенията. В някои приложения обаче е важна и информацията за местоположението и формата на отложения лед и скреж – напр. в авиацията, при вятърните турбини и др., където формата променя съществено аеродинамичните характеристики на съоръжението.

Физическите величини и структурните характеристики на обекта, които обуславят обледяването и определят неговата интензивност и форма, се променят непрекъснато във времето и освен това си влияят една на друга. Всички тези взаимовръзки и непрекъснати промени трябва да бъдат отчетени от модела и това прави моделирането на обледяването сложно. Всички теоретични модели, описани в дисертацията, вече са постигнали забележително голяма точност, но освен тежки пресмятания, те изискват и много подробна входяща информация на всеки един етап, която невинаги е налична. Алтернатива на тези модели са описаните в следващата глава опростени модели за оценка на обледяването.

## **Глава II. Практически методи за количествена оценка на натоварването от обледяване**

Опростените модели за обледяване позволяват по-груба оценка на масата на отложението на базата на някакви прости корелационни зависимости, но са особено полезни, когато невсички необходими входящи параметри са известни. Така те са се наложили като напълно приложими практически методи за количествена оценка на различните видове обледяване. В тази глава е направено кратко описание на основните такива практически методи, като особено внимание е отделено на най-важните от тях. Представянето на опростените модели е извършено по вида на обледяването – скреж, преохладени валежи и мокър сняг.

Параграф 2.1. разглежда опростените модели за облачно обледяване при сух режим на нарастване, т.е. заскрежаването. Първо в параграф 2.1.1. са дадени няколко, експериментално получени, прости корелационни зависимости на интензивността на заскрежаването от скоростта на вятъра. Най-широко разпространение е получила установената от Ахти и Макконен [31] зависимост

$$I = 11.0 \times 10^{-3} V , \quad (39)$$

и дори е включена в стандарта ISO 12494 “Атмосферно обледяване на конструкции” като препоръчителна.

Следващият параграф 2.1.2. представя някои от методите, които са базирани на повече и по-сложни зависимости. Тук са описани два такива – моделът на Станев и Моралийски [32, 33] и методът на Харствейт [34].

За определяне на преохладеното водно съдържание, размерите на капчиците на облака и плътността на отложението моделът на Станев и Моралийски използва три експериментално установени зависимости, които са:

- между LWC и хоризонталната видимост;
- между плътността на отложението и температурата на въздуха;
- между размера на капчиците и температурата на въздуха.

Методът на Харствейт [34] съчетава емпирично установени зависимости и стойности с теоретични обосновки. Той използва METAR данни за височината и количеството на ниската облачност, вертикални сондажи за температурата и вятъра, теоретични оценки на вертикалния градиент на водното съдържание в облака, при предположение, че цялата налична водна пара кондензира при адиабатно издигане на въздуха и постоянство на броя на капчиците. В допълнение се използват и дългогодишни осреднени оценки за Норвегия за този брой, за средния обемен диаметър на капчиците и данни за хоризонталната видимост от близка метеорологична станция.

В следващия параграф 2.2. са изложени методите за оценка на обледяването от преохладени валежи, където са представени шест такива метода (35 – 39).

Параграф 2.3. от тази глава е посветен на методите за оценка на обледяването от мокър сняг. Тук подробно са представени следните пет модела: 40, 26, 41, 20, 25, и са описани с формули от 52 до 70 в дисертацията. Всички тези модели приемат за приближение кръгла форма на отложението от мокър сняг, което е много близко до реалността. Първите четири от тях използват за оценка на водното съдържание във въздуха ( $w$ ,  $\text{kg/m}^3$ ) приравняването на количеството валеж върху един квадратен метър за час ( $P$ ,  $\text{mm/h}$ ) с вертикалната плътност на потока, която е произведение от водното съдържание във въздуха или концентрацията на снежинки в единица обем със скоростта на падане на последните  $V_t$  ( $\text{m/s}$ )

$$w = \frac{P}{3600 \cdot V_t} \quad (55)$$

За равновесната скорост на падане на снежинките в [40], както и в следващите три споменати модела, е приета скоростта от 1 m/s. Всъщност разликите между тях са единствено в представянето на коефициента на прилепване и плътността на отложението.

За разлика от тези модели методът, предложен от Макконен [20], оценява тази величина не чрез интензивността на валежа и скоростта на падане на снежинките (която най-често е неизвестна), а чрез една експериментално установена от Сталабрас [42] зависимост на тази концентрация от хоризонталната видимост при снеговалеж

$$W = 2100 V_m^{-1,29} \quad (64)$$

Освен това Макконен [20] извежда критерий за разпознаването на валеж от мокър сняг, който позволява определянето на продължителността на процес на натрупване

$$t_a > \frac{1.75 \cdot 10^3}{p} (6.11 - \text{Re}_s(t_a)), \quad (68)$$

където  $t_a$  е температурата на въздуха,  $R$  е относителната влажност на въздуха,  $p$  е атмосферното налягане (hPa), а  $e_s$  – налягането на наситените водни пари над лед, или в още по-опростен вид:

$$t_w > 0^\circ\text{C}, \quad (69)$$

където  $t_w$  е температурата на мокрия термометър.

В подобрения модел [25] този критерий е малко променен, за да се отчете температурата на височината на проводниците, където става отложението

$$t_w > -0.2^\circ\text{C} \quad (70)$$

В последния параграф от Глава II е дадена информация за методите за определяне изменението на обледяването с височина и влиянието на релефа.

В следващите три глави са представени получените резултати на изследванията по дисертационния труд.

## **Глава III. Климатологични изследвания на обледяването на различни места в Европа**

В тази глава са представени резултатите от климатологични изследвания върху явлението и възможните натоварвания от него в следните няколко европейски района: Германия, Словакия и България. Изследването за Германия включва само случаите на мокър сняг, това за Словакия е фокусирано върху заскрежаването в планинските ѝ райони, а проучването за България разглежда всички видове обледявания, без мокрия сняг, както в планинските, така и в непланинските части на страната. Първото е базирано на данни от двадесетгодишен период на метеорологични наблюдения, второто на 12 години, а това за България обхваща основно период от 30, но за някои станции стига и до 40 години.

### 3.1. Климатични характеристики на обледяването в непланинските (под 1000 m) райони на България

Климатичните характеристики, които са изследвани, са брой дни с обледяване и брой случаи, период на проявяване и повторемост по месеци, продължителност на процеса и характерни метеорологични условия, при които протича явлението – температура и относителна влажност на въздуха, посока и скорост на вятъра при обледяване.

#### 3.1.1.1. Брой дни с обледяване

Под “ден с обледяване” се разбира всеки такъв, в който е регистрирано наличие на процес на обледяване поне в един от сроковете за наблюдение. Средно сезонният брой дни с поледици е най-голям за Северна България, с максимуми на северозапад (Враца, Видин) и североизток (Добрич, Калиакра, Разград). В районите на Враца и Добрич всяка зима се наблюдават почти три дни с поледици. Този брой остава сравнително висок (около 2 дни) и за останалата част от Северна България – Централна Северна България. В същите райони е сравнително висок и броят на дните със скреж, но най-висок е за районите на Русе, Велико Търново и Кнежа, следвани от Лом и Разград. Това е обусловено най-вече от релефа или от близостта на тези райони до големи водни източници. В цяла Южна България броят дни с поледица е значително по-нисък от този в северна, а най-нисък е в районите на Сандански и Драгоман – средно около един ден на пет години, но за района на Драгоман е



относително висок броят дни със скреж – средно един ден през зимата. Най-малък е този брой в крайбрежните и най-крайните югозападни райони на страната – Ахтопол, Варна, Сандански и Шабла. В първите три изобщо няма регистрирано заскрежаване през целия изследван период. Това се дължи на по-южното местоположение на тези райони (Сандански) и затоплящото влияние на морето през зимата.

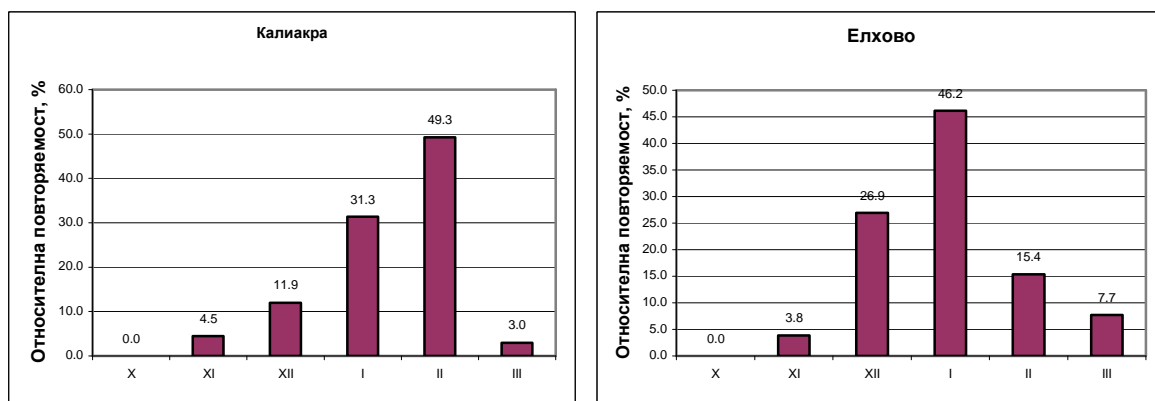
### 3.1.1.2. Брой случаи

Поради относително малкия брой случаи в Южна България тази характеристика е представена като среден брой за 10 години. Най-много случаи на обледяване се регистрират в районите на Грамада (250 m), Самуил (476 m) и Вакарел (851 m) – съответно 22, 40 и 62 за 10 години. Освен по-високия брой случаи характерно за тези райони е преобладаването на заскрежаването като вид обледяване. Причината за тези два факта е високата относителна височина спрямо околния терен на първите два района и съответно по-ниско разположено ниво на заскрежаване (виж параграф 2.4). Районът на Вакарел е с височина, при която през зимата силно влияние оказва и ниската облачност – на това се дължи и големият брой случаи в сравнение с другите по-ниско разположени райони от Южна България. Затова е по-подходящо да се класифицира като припланински район и да се разглежда в частта за планинските станции, както е и направено.

Резултатите за тази характеристика на процеса на обледяване са представени в обобщаващата таблица 9. Отново се откроява разликата между Южна и Северна България. Най-много случаи се наблюдават в Североизточна България – 40 в района на Самуил; средно около 20 случая на 10 години в районите на Разград, Добрич, Калиакра; 11 за Русе и най-малко за районите на Силистра и Шумен. В Северозападна България най-много случаи са наблюдавани в района на Грамада и Враца – средно по 22 и 20 случая за 10 години, последвани от района на Ново село и Видин – около 8 случая. В Централна Северна България се наблюдават средно около 11, а в цяла Южна са значително по-малко и варират от средно 1 за 10 години за района на Сандански и Кърджали, през 3 за районите на Елхово и Свиленград, до 7 за същия период за Чирпан и Хасково.

### 3.1.1.3. Период на проявяване и повторяемост по месеци

Периодът на проявяване на обледяването обхваща месеците от ноември до март в цяла Северна България. Подобна е ситуацията и в Централна Южна (Ивайло, Чирпан и др.) и Югоизточна България (Елхово, Карнобат), но със значително по-малък брой случаи през ноември и март – около 3 и 7% (табл. 5). В Югозападна България (Сандански) поледица се проявява само в три месеца – от декември до февруари, а скреж, както бе уточнено вече, изобщо няма. В Северна България обикновено се наблюдава плавно нарастване на случаите от ноември, с максимум през м. януари и по-рязко намаляване през февруари. Единствено в районите на Враца и Кнежа тази тенденция е по-слабо изразена – с много близък брой случаи през декември и януари, а в района на станция Шабла се наблюдава обърната тенденция с по-плавно намаляване през м. февруари в сравнение с м. декември. Подобно е разпределението по месеци и в Южна България, но с по-силно изразен максимум през януари. Очебийно изключение от общата картината е станция Калиакра, където максимумът е изместен към февруари (фигура 22), което вероятно се дължи на влиянието на морето и изпъкналостта на релефа на това място.



**Фиг. 22. и 23.** Относителна повторяемост на случаите с обледяване за ст. Калиакра и ст. Елхово

### 3.1.1.4. Продължителност на процеса на обледяване

Най-често процесът протича в рамките на шест часа – почти навсякъде този интервал има много силно изразен максимум. Единственото изключение са станции Кнежа, Разград и Самуил. В първите две максимумът обхваща и втория часови интервал, а в станция Разград се проявява и вторичен максимум за интервала 24.1-48.0 часа. Това по-особено разпределение на продължителността на процеса в района на Самуил също е обусловено от

особеностите на релефа – висока относителна височина по отношение на околния терен и откритост спрямо преобладаващите ветрове при обледяване, което силно подпомага образуването на плътна ниска облачност с голяма продължителност.

### 3.1.2.1. Температура на въздуха

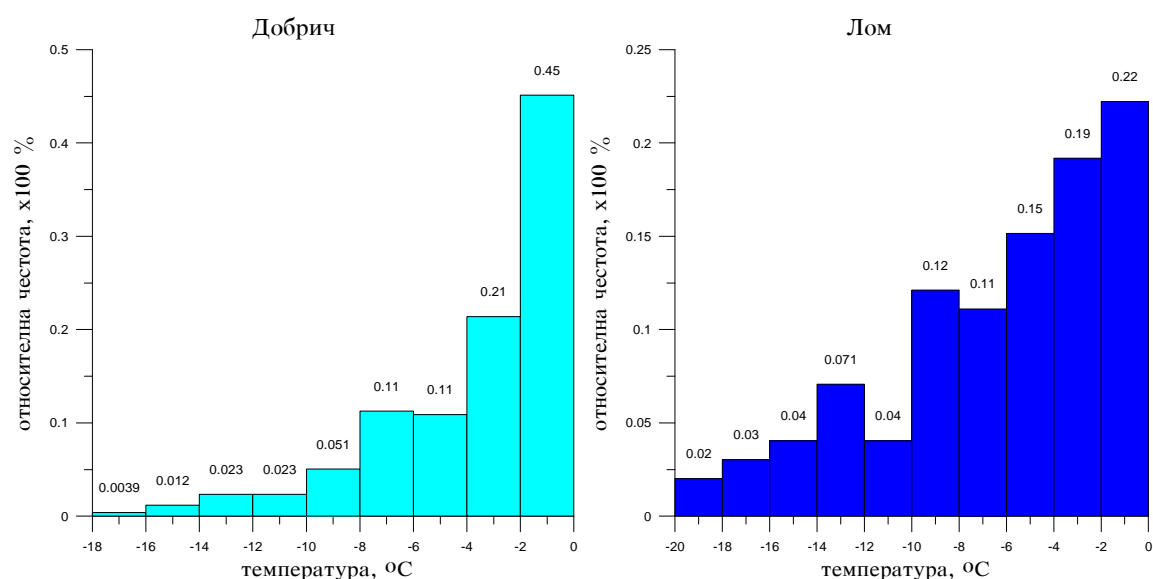
Както беше описано още във въведението, температурата на въздуха при обледяване варира в широки граници в зависимост от вида на отложението. Най-често температурата на въздуха при поледица е в интервала от нула до – 5 °C, при зърнест скреж обикновено е между – 3 и – 8 °C, а при кристален скреж е от – 10 до – 20 °C. При всички станции от непланинските райони има максимум в температурния интервал от – 0.1 до – 4.0 °C. В болшинството от тях този максимум е над 70 %, а в някои – около и над 90 %: Ново село, Оряхово, Велико Търново, Свищов, Ивайло, Чирпан, Елхово и др. Само в отделни станции (Грамада, Самуил, Разград, Калиакра, Силистра и Враца) съществен процент от случаите – между 15 и 30 %, се падат и в следващите две температурни градации. Средната температура при поледица за района на Добрич е – 1.6 °C; за района на Русе, Силистра, Враца и Кнежа е около – 2.3 °C; за Лом, Ново село, Елхово и Чирпан е около – 1.9 °C. Температурата при заскрежаване е значително по-ниска от тази при поледица. Минималните регистрирани стойности при зърнест скреж достигат до около минус 9 – минус 10 градуса, а тези при кристален скреж и до – 20 °C. Средната температура при заскрежаване в района на Добрич например е – 6.3 °C, а минималната – 14.0°C. Температурите на въздуха при заскрежаване в непланинските райони на страната са най-ниски по поречията на реки в Северна България, например в Лом средната такава е – 8.9 °C, а минималната е – 18.3 °C.

На следващите две фигури са представени хистограмите на температурата на въздуха при обледяване (поледица и скреж) за станции Добрич и Лом. В станция Добрич (фиг. 25) се откроява много добре максимумът в интервала до – 2.0 °C – при 45 % от случаите. Няма ясни индикации за максимумите в разпределението на температурата при зърнестия и кристалния скреж, но това е така, защото в Добрич преобладаващият вид отложение е

поледицата. В района на Лом обаче преобладава заскрежаването (70 % от случаите) и на хистограмата на температурата при обледяване за тази станция (фиг. 26) могат да се открият тези относителни нараствания в температурните интервали от  $-8.1$  до  $-10.0$  °C за зърнестия и от  $-12.1$  до  $-14.0$  °C за кристалния скреж, като последният е ясно различим и съответства на теоретичните очаквания, както бе описано още в увода.

### 3.1.2.2. Посока и скорост на вятъра

Преобладаващата посока на вятъра при обледяване в непланинските райони от страната за всички станции е от северния сектор. В Северозападна и Югозападна България това е северозапад и север, в Северна, Североизточна и Югоизточна – север и североизток. Скоростта на вятъра при обледяване в ниската част на страната не е висока – най-често до 5 m/s, с изключение на някои от североизточните райони: Самуил, Разград, Силистра Шумен и Калиакра.



Фиг. 25. и 26. Хистограми на температурата при обледяване в ст. Добрич и ст. Лом

В следващата таблица 9 са обобщени всички изследвани климатични характеристики на обледяването в непланинската част на страната във вид на средни стойности. Вижда се, че най-много случаи има в изпъкналите райони на Северозападна и Североизточна България – Грамада, Разград и Самуил. На същите места се наблюдават и най-големите средни продължителности на процеса.

**Таблица 9.** Осреднени стойности на: брой обледявания за 10 години, продължителност на процеса, температура и относителна влажност на въздуха и скорост на вятъра при обледяване

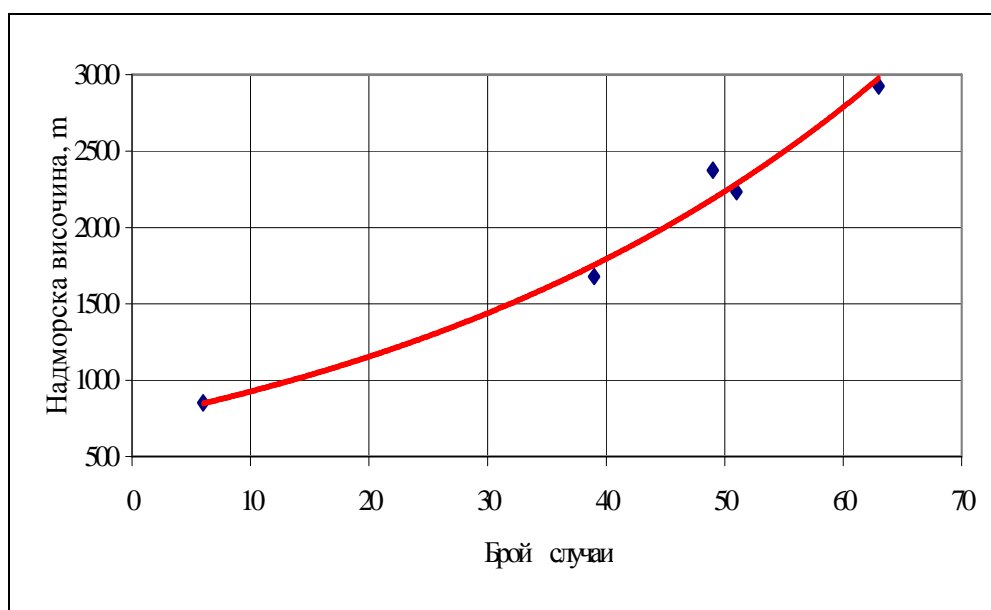
Станция	Н.В., m	Ср. брой за 10 г.	Ср. прод., h	Ср. темп., °C	Ср. скор., m/s	Ср. отн. влажн., %
<b><i>Северозападна България</i></b>						
Ново село	45	8	12.2	-2.2	2.6	93
Грамада	250	22	13.1	-3.1	2.1	95
Лом	35	10	11.2	-0.9	1.0	92
Враца	358	20	9.4	-2.5	0.7	93
Кнежа	120	3	7.5	-2.0	0.5	93
Оряхово	29	6	10.7	-1.4	1.4	93
<b><i>Централна Северна България</i></b>						
Ловеч	197	12	13.2	-3.2	1.5	94
Търново	198	6	14.9	-2.5	0.4	93
Свищов	79	11	7.0	-1.8	2.9	92
<b><i>Североизточна България</i></b>						
Русе	44	11	9.8	-1.7	5.1	93
Разград	206	25	22.1	-3.8	4.4	95
Самуил	476	40	54.4	-4.8	4.8	95
Силистра	16	4	9.3	-2.8	6.3	93
Шумен	216	5	8.6	-2.1	3.0	91
Добрич	255	19	7.0	-1.6	3.0	96
Калиакра	63	15	24.9	-1.6	11.3	99
<b><i>Югозападна България</i></b>						
Ихтиман	636	3	8.2	-1.3	2.8	94
<b><i>Централна Южна България</i></b>						
Ивайло	215	6	6.4	-0.9	0.7	93
Чирпан	170	7	9.2	-1.9	0.9	97
<b><i>Югоизточна България</i></b>						
Елхово	130	3	11.2	-1.9	4.1	91

### 3.2. Климатични характеристики на обледяването в планинските райони на България

Тук са изследвани същите климатични характеристики, както и за непланинската част на страната, и само хоризонталната видимост в мъглата е добавена в метеорологичните условия. За оценка на тези характеристики са използвани данните за обледяване в периода 1980-1990 г. от следните шест метеорологични станции на НИМХ в припланински и планински райони: Вакарел /851m./, вр. Мургаш /1678 m./, вр. Снежанка /1923 m./, Черни връх /2286 m./, вр. Ботев /2376 m./ и вр. Мусала.

#### 3.2.1.1. Брой случаи и брой дни с обледяване

Броят случаи в планинските райони на страната е значително по-голям от този в ниската част и нараства с височина. За изследваните станции средногодишният брой случаи е както следва: Вакарел – 6, вр. Снежанка – 10, вр. Мургаш – 39; Черни връх – 51, Ботев връх – 49 и вр. Мусала – 63. Това изменение е представено на фиг. 28. с изключение вр. Снежанка

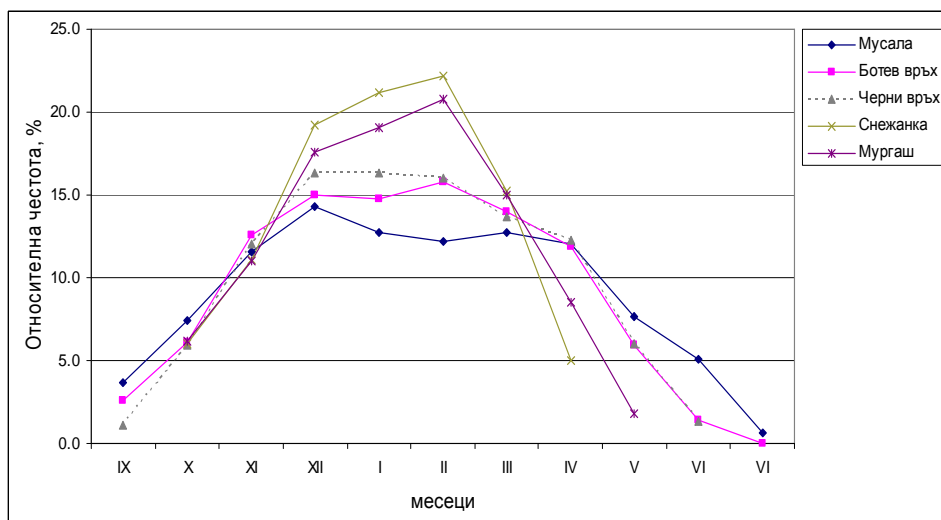


**Фиг. 28.** Изменение на средногодишния брой случаи с височина за района на Централна Западна България

#### 3.2.1.2. Период на проявяване и повторяемост по месеци

Възможният период на обледяване в планинските райони силно зависи от надморската височина. В по-ниските припланински части (Вакарел) обхваща месеците от ноември до март, на вр. Мургаш е от октомври до май, в районите на Черни и Ботев връх вече е от декември до юни, а на вр. Мусала продължава почти цялогодично. Максимумът на относителната честота на броя случаи е най-силно изразен за района на Вакарел – през януари с над 33 % от общия им

брой. С височина постепенно се разпределя по-равномерно, като за Мургаш и Снежанка се наблюдава изместване на максимума към месец февруари – фиг. 29.



**Фиг. 29.** Относителна честота на броя случаи на обледяване по месеци

### 3.2.1.3. Начало, край и продължителност на процеса на обледяване

Най-големите регистрирани продължителности през използвания период са 48, 54, 138, 154, 189 и 219 часа, съответно за Вакарел, вр. Снежанка, вр. Мусала, вр. Мургаш, Черни връх и Ботев връх (вж. таблица 13). Интегралните криви на годишните максимуми на продължителността на процеса са апроксимирани посредством разпределението на Фишер – Типет II тип и изправени в подходяща координатна система. Стойностите на максималната продължителност на процеса с различна обезпеченост за някои от станциите са представени в таблица 11.

**Таблица 11.** Стойности (часове) на максималната продължителност на процеса на обледяване с различна обезпеченост

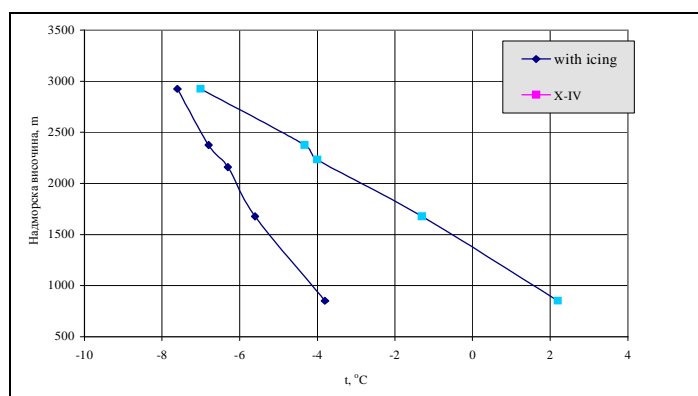
Станция	Стойности с период на повторение веднъж в съответния период години Y			
	2Y	5Y	10Y	20Y
вр. Мургаш	105	135	160	190
вр. Ботев	120	170	210	235
вр. Мусала	95	115	135	150

### 3.2.2.1. Температура на въздуха

Средната температура на въздуха при обледяване в района на Вакарел е – 3.8 °С, на вр. Снежанка – 4.8 °С, на вр. Мургаш – 5.6 °С, на Черни връх – 6.3 °С, на вр. Ботев – 6.8 °С и на вр. Мусала – 7.6 °С. Вертикалният профил на средната температура на въздуха при обледяване за Централна Западна България е представен на фиг. 38, заедно с изменението на средната температура на въздуха за периода октомври – април с надморската височина. Вижда се, че температурата на въздуха при обледяване се изменя в 2.5 пъти по-тесен интервал отколкото изобщо през студеното полугодие.

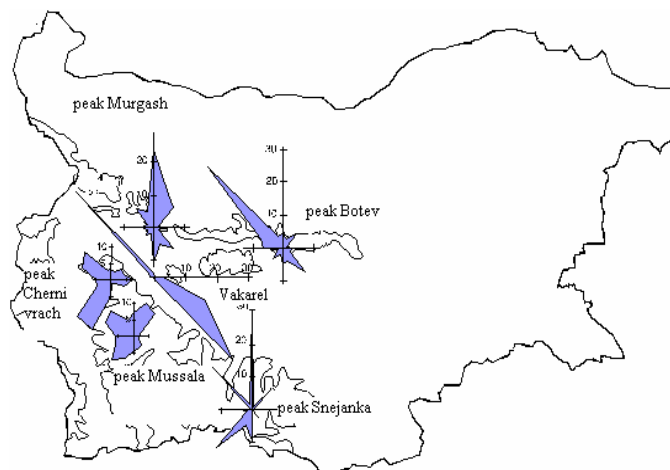
### 3.2.2.2. Посока и скорост на вятъра

Разпределението на посоката на вятъра при обледяване в районите на използваните станции е показано на фиг. 40. В района на Черни връх обледяванията са най-често при нахлуване на средиземноморски въздух от югозапад и юг-югозапад – в около 15 % от всички случаи. За района на вр. Ботев преобладаващата посока на вятъра при обледяване е от северозапад с над 30 % от случаите, а в района на вр. Мургаш посоката с най-голяма повтораемост е северната – над 20 %. Средната скорост на вятъра при обледяване е както следва: Вакарел – около 4 m/s, Снежанка – 5 m/s, Мургаш – 12 m/s, Черни връх – 13.5 m/s, вр. Ботев – 14.5 m/s и вр. Мусала – 10.5 m/s. На фиг. 41. е представен вертикалният профил на средната скорост при обледяване за Централна Западна България и през периода октомври – април. От нея се вижда, че докато през студеното полугодие, а така е и изобщо през цялата година, най-високи скорости на вятъра се наблюдават на вр. Мургаш, то при обледяване те са най-големи за района на вр. Ботев.

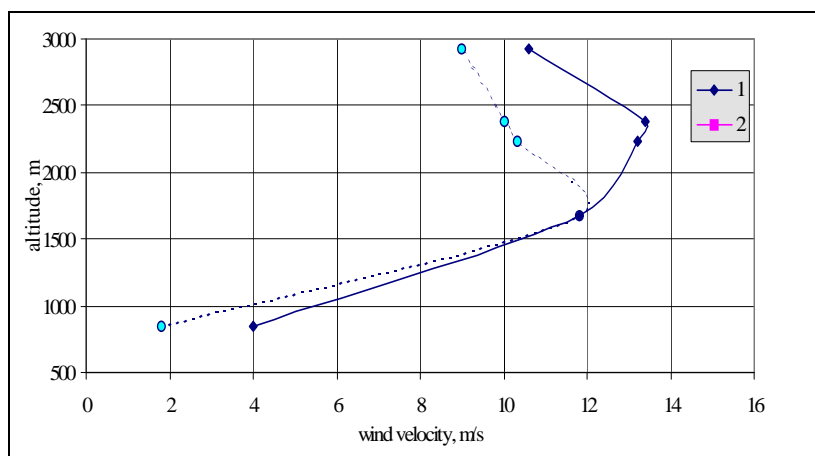


**Фиг. 38.** Изменение на средната температура на въздуха с височина при обледяване (with icing) и през студеното полугодие (X-IV)





Фиг. 40. Рози на вятъра при обледяване за шестте използвани станции



Фиг. 41. Изменение на средната скорост на вятъра при обледяване (1) и през периода октомври – април (2) с надморската височина

Обобщените резултати от изследването на планинските райони са дадени в таблица 13.

**Таблица 13.** Средногодишен брой случаи (N), среден брой на дни с мъгла през студеното полугодие ( $N_{f.d.}$ ), максимална продължителност на процеса на обледяване в часове ( $L_{max}$ ), средна температура на въздуха при обледяване ( $t$ ), средна скорост на вятъра при обледяване ( $V$ ) и хоризонтална видимост при обледяване.

No	Станция	N	Nf.d.	Lmax (h)	$t^{\circ}C$	V, m/s	х.в. (m)
1.	Вакарел	6	66	48	-3.8	4.2	80
2.	вр. Мургаш	39	130	153	-5.6	11.5	20
3.	вр. Снежанка	10	96	54	-4.8	4.7	70
4.	Черни връх	51	130	189	-6.3	11.9	40
5.	Ботев връх	49	140	219	-6.8	14.0	30
6.	вр. Мусала	63	125	138	-7.6	10.6	50

Анализът на климатичните характеристики на процеса на обледяване в планинските райони на България показва, че той протича с умерени до силни ветрове при отрицателни температури на въздуха в доста широк интервал и гъсти адвективни мъгли (облаци) с голяма продължителност. За станция Вакарел получените характеристики са чувствително по-малки от тези за другите планински станции, но пък са по-големи от тези за непланинските райони на страната. Така районите с такава надморска височина най-вероятно се явяват преходни по отношение на обледяването. При всички изследвани климатични характеристики прави впечатление отклонението, което се получава за района на вр. Снежанка. Характеристиките за тази станция отговарят като за по-ниска надморска височина, което вероятно се дължи на по-южното ѝ местоположение и затоплящото влияние на Средиземно море.

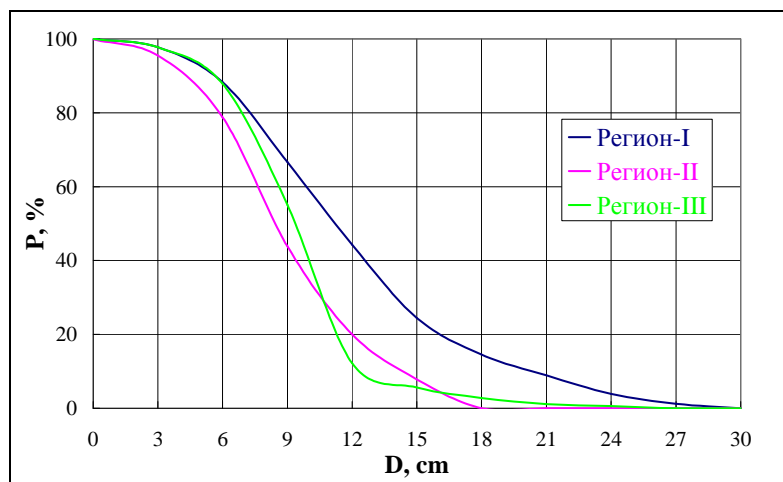
### 3.3. Райониране на страната по натоварване от обледяване

Освен изследване на общите и метеорологичните характеристики на процеса на обледяване е направено и райониране на България по натоварване от обледяване. За непланинските райони на страната (без Северозападна България, за където нямахме никаква информация) това е извършено по данни за размерите и масата на отложенията в случаи на аварии от обледяване, а за планинските райони – на базата на моделни оценки с помощта на описания в Глава II метод на Станев и Моралийски. Построени са интегралните криви на разпределението на диаметъра, масата и приведената към плътност 900 kg/m<sup>3</sup> дебелина на ледената стеничка. С използването на подходящо разпределение след това са определени нормативните стойности, възможни веднъж на определен брой години. По този начин са установени четири района – три равнинни и един планински. Първият район обхваща Югозападна, вторият Югоизточна, а третият – Североизточна България. Четвъртият е планинският район. Част от тези резултати са представени в таблици 14. и 16. и на фиг. 42.

**Таблица 14.** Обобщение на основните характеристики на обледяването в трите непланински района

	Вид на обледяването	Средна плътност (kg/m <sup>3</sup> )	Преобладаваща посока на вятъра	Средна скорост на вятъра (m/s)	Натоварване от обледяване (kN/m <sup>2</sup> )
Регион I	скреж	370	NW	9	817
Регион II	мокър сняг	560	N	10	790

Регион III	поледица	760	NE	40	873
------------	----------	-----	----	----	-----



**Фиг. 42.** Интегрални криви на разпределението на диаметъра на отложенията за трите непланински района

**Таблица 16.** Стойности на сезонния максимум на радиуса (cm) на обледяването, възможни поне веднъж на определен брой години за станции Мургаш, Черни връх и Мусала

проводник	Стойности, възможни поне веднъж на:			
	2 г.	5 г.	10 г.	20 г.
<b>Мургаш</b>				
вертикален	13.0	15.5	17.0	19.5
по меридиана	8.5	10.5	12.0	13.5
по паралела	12.0	14.5	16.0	18.0
<b>Черни връх</b>				
вертикален	18.5	21.5	23.5	25.5
по меридиана	13.5	15.0	16.0	17.0
по паралела	15.5	18.0	20.0	23.0
<b>Мусала</b>				
вертикален	15.0	19.0	22.0	24.0
по меридиана	11.5	15.5	18.0	22.0
по паралела	12.5	17.0	19.5	23.0

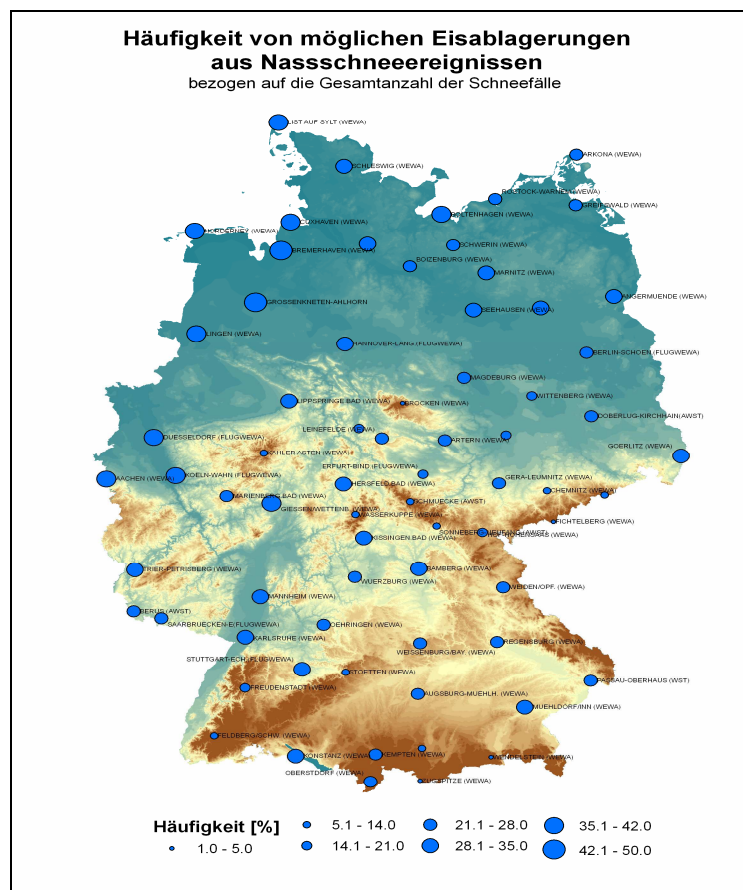
В следващия параграф 3.4. са представени резултатите от Сравнително изследване на метеорологичните условия в планинските райони на България и Словакия. От откритите сходства и разлики с българските станции може да се

предполага, че обледяването в планинските райони на Словакия не е така интензивно и продължително, както е в планинските райони на България. В тези райони нивото, където обледяването е най-често, най-продължително и с най-високи скорости на вятъра, вероятно е разположено на по-ниска надморска височина – между 2000 и 2200 m, докато у нас е с около 200 m по-високо.

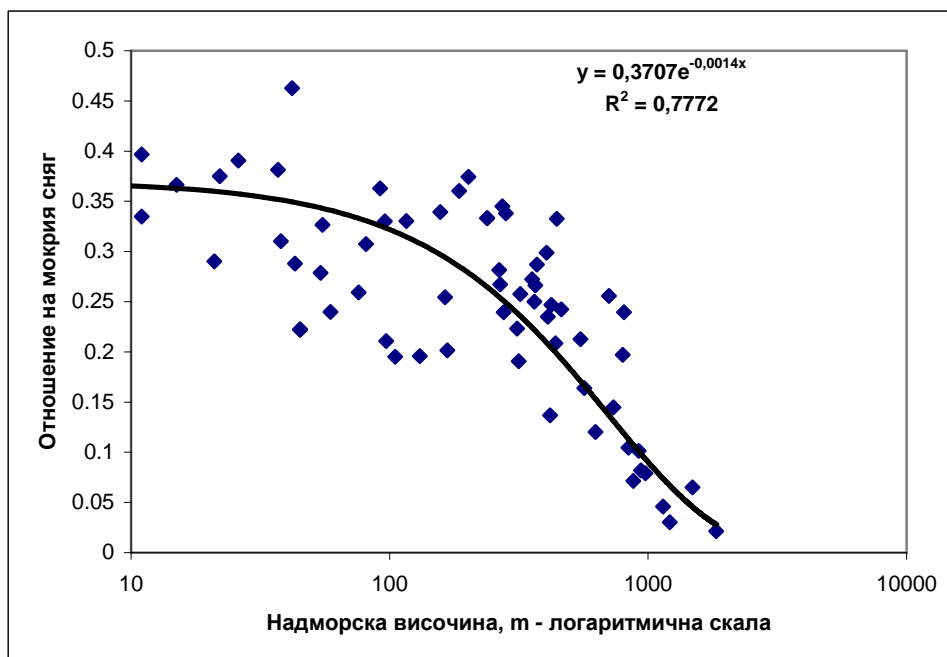
В последния параграф от тази глава (3.5) са представени резултатите от пространствено и времево разпределение на случаите на мокър сняг и оценка на съответното натоварване в Германия.

На базата на селектираните случаи с мокър сняг с помощта на критерия на Макконен (формули 68-70) са установени следните климатични характеристики на процеса на мокър сняг в Германия: т. нар. коефициент на мокър сняг, който е определен като отношение на часовете с мокър сняг към часовете със снеговалеж за съответната станция и може да се разглежда като някаква мярка за честота и застрашеност на дадения район; брой на случаите с мокър сняг и продължителността им; средните стойности на някои от метеорологичните величини при това явление, като температура на въздуха, скорост на вятъра и хоризонтална видимост, както и преобладаваща посока на вятъра. Разпределението на коефициента на мокър сняг е представено на фиг. 55. Вижда се, че явлението е относително по-често срещано в западната част на страната (коефициент между 34 и 38 %), а най-големи стойности коефициентът на мокър сняг има в северозападните крайбрежни райони – до 44 %. Именно в тези райони се е случила и аварията през 2005 г. Неочаквано високи стойности се установиха за Южна Германия, особено в предалпийските райони – Бамберг, Констанц, Кемптен, Оберсдорф и др. Това може да бъде обяснено с влиянието на планината върху усилването на възходящите процеси на сравнително топли въздушни маси и увеличаване на общия брой часове снеговалеж.

На фигура 56. е представена зависимостта на коефициента на мокър сняг от надморската височина, построена по данни от всички използвани станции. За по-добра нагледност надморската височина е дадена в логаритмична скала.



Фиг. 55. Географско разпределение на коефициента на мокър сняг в Германия



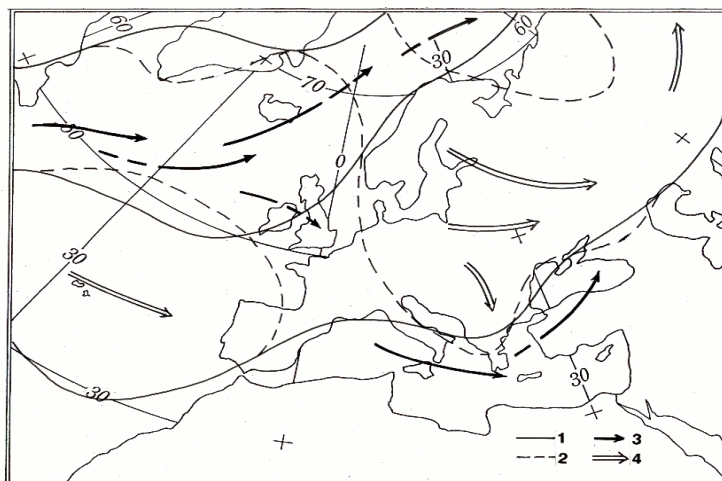
Фиг. 56. Изменение на коефициента на мокър сняг с надморска височина

Изследвани са следните климатични характеристики на мокрия сняг: температурата на въздуха, посоката и скоростта на вятъра, продължителността, както и месечните и сезонните часове мокър сняг. В

последната подточка на този параграф (3.5.3.) е направена оценка на възможното натоварване от обледяване от мокър сняг за различни периоди на повторение с помощта на модела на Макконен и Вихура [25], като сезонните максимуми са апроксимирани с разпределението на Гумбел, интегралните криви са изправени в подходяща координатна система, а параметрите на разпределението са определени по два метода – на най-малките квадрати и на максималното правдоподобие.

#### Глава IV. Анализ и класификация на синоптичните обстановки при обледяване

В тази глава първо е извършен подробен анализ на синоптичната обстановка при аварийното обледяване в периода 20-30.11.1998 (параграф 4.1.), а после е направена (параграф 4.2.) субективна класификация на синоптичните обстановки, водещи до обледяване в България на всички случаи на поледици в България за периода 1971-2000 г. Така се откриха четири основни типа синоптични обстановки при обледяване от преохладени валежи, които са представени подробно в дисертацията. На фиг. 68. е представена обобщената ситуация за първия тип обстановка.

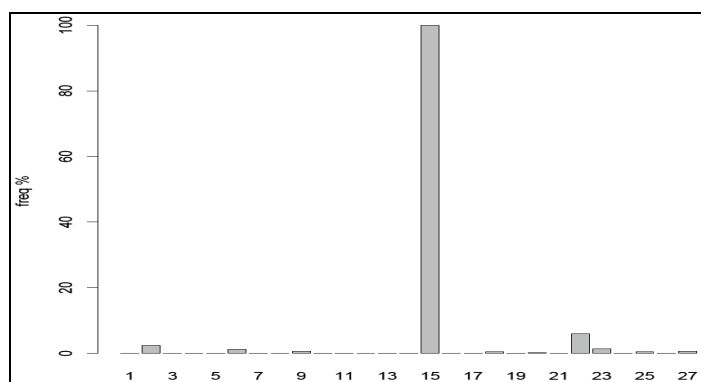


**Фиг. 68.** Схематично представяне на обобщената синоптична ситуация през периода 20-30.11.1998 г.: 1 – преобладаващи зони на ниско налягане, 2 – зони с преобладаващо антициклонално поле, 3 – пътища на циклоните и 4 – пътища на антициклоните

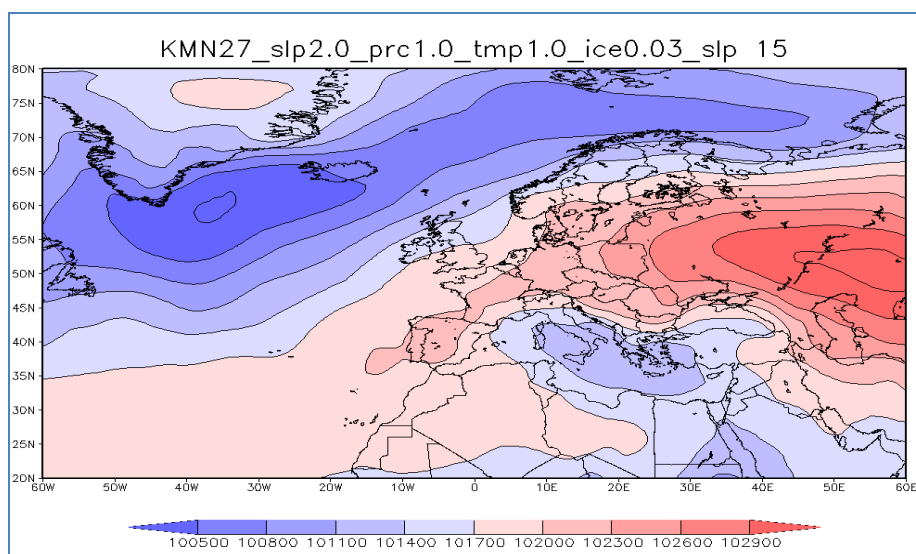
В последващия параграф 4.3. е направена и обективна класификация на същите обстановки. Тествани са два вида класификации – една комбинирана и една обективна, базирана на клъстерен анализ с две разновидности в

зависимост от избора на метода за първоначално разделяне. Първата класификация е означена с GWT (Grosswetter-types – типове едромащабно време) и се основава на Хес и Брезовски каталога, но използва и обективна оценка на приземното барично поле за определяне степента на зоналност, меридионалност и завихряне [43]. Другите две класификации (основани на нейерархичен клъстерен анализ) са означени, както бе прието в COST 733 проекта с DKM, KMN. В случая най-добрите постигнати резултати са за KMN класификация със следните тегла на елементите: приземно барично поле – 2; количество валеж – 1; температура на 850 hPa – също 1 и обледяване – 0,03 – фиг. 72.

На фигура 75. е представено полето на приземното барично поле за група 15 на същата класификация, която е много сходна с установения тип I от субективната класификация.



**Фиг. 72.** Разпределението на обледяванията по групите на класификация KMN27\_slp2.0\_prc1.0\_temp1.0\_ice0.3



**Фиг. 75.** Графика на приземното барично поле за група 15 на класификация KMN27\_slp2.0\_prc1.0\_temp1.0\_ice0.3

## **Глава V. Анализ на отделни случаи и практическо приложение на методите за количествена оценка на обледяването на различни места в Европа**

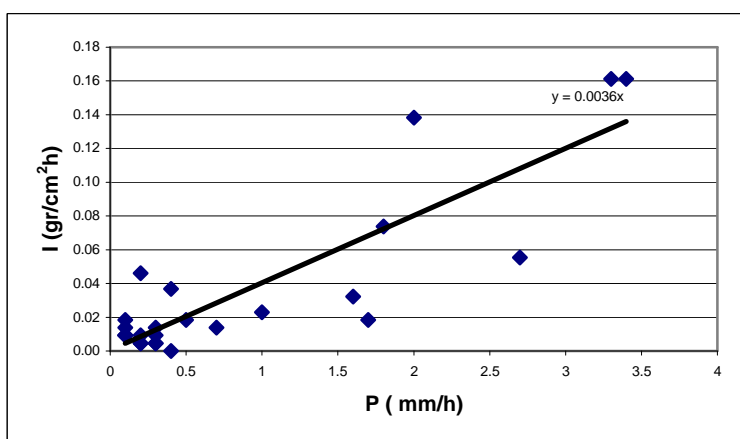
Анализите на тези случаи са отделени в отделна глава, защото периодът с данни, който е използван, е прекалено кратък за климатично изследване, но получените резултати са интересни и важни. Включени са няколко разнородни случая на обледяване: обледяване на вятърни турбини и ветрови мачти; заскрежаване на големи цилиндри в планински условия и обледяване на проводници от мокър сняг.

В първия параграф от тази глава (5.1.) са коментирани резултати от експерименталното изследване в Оберщралбах, Австрия. Представени са накратко резултатите от оценката на обледяването и сравняването им с измерванията на обледяването в рамките на два зимни сезона (2002/03 и 2003/04) в една тестова станция в района на Оберщралбах, Австрия, както и оценката на влиянието му върху продукцията на една вятърна турбина в същия район за един зимен сезон. Общият брой на регистрираните случаи е 35, или средно по около 17 случая годишно. Това е значително повече от броя за станция Вакарел, която е с по-голяма надморска височина, но краткият период на измерване не дава основание за категоричен извод. За разлика от това обаче стойностите за масата на отложенията в ст. Оберщралбах са значително по-малки от тези във Вакарел. В района на австрийската станция максималното отложение е 0.366 kg/m, докато във Вакарел средната годишна стойност на масата на отложението е около 2.2 kg/m. Процесът обикновено е с малка продължителност – под 10 часа. Има обаче и пет процеса с продължителност над 20 часа, което за период от две години може да означава, че такива случаи не са рядкост. За съжаление краткият срок на измерване не позволява точна статистическа оценка.

От регистрираните 35 случая 29 са заскрежаване и 6 са поледица. Всички те бяха подробно изследвани, а повечето от тях (освен най-кратките) и оценени с помощта на някои от опростените модели за обледяване от скреж и преохладени валежи, описани в Глава II. По-долу е показан резултатът от изследването на вероятна зависимост между интензитета на валежа и интензитета на обледяването в случаите на преохладен валеж. Въпреки че



такава зависимост теоретично би трябвало да се очаква, досега повечето автори съобщават, че не откриват такава. Затова направихме просто регресионно изследване между двете величини и получихме изненадващо добър резултат – коефициентът на корелация е 0.86. На фигура 78. е представена съответната графика. За съжаление този резултат се базира само на шест случая на преохладени валежи и отново не може да бъде определен като статистически надежден.



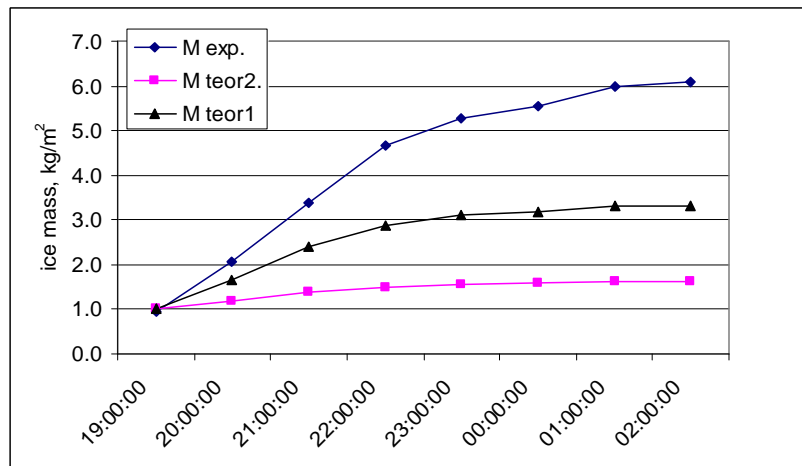
**Фиг. 78.** Графика на зависимостта между интензитета на валежа P (mm/h) и интензитета на обледяването I (gr/cm<sup>2</sup>h)

Направена бе и оценка на най-дългия случай с преохладен валеж от 22.12.2012 с продължителност от осем часа. За целта бе използван методът на Съндин и Макконен (параграф 2.2.6.) с две различни апроксимации на водното съдържание във въздуха. Резултатите, представени на фиг. 79., показват значително подценяване на измерените стойности. Това обаче може да се дължи на допълнително натрупване на скреж от мъгла.

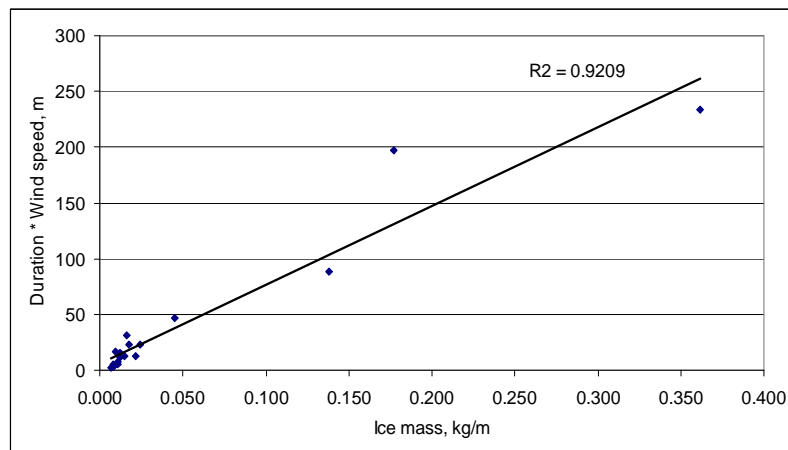
Облачното обледяване първоначално бе оценено с цитираната [31] зависимост на заскрежаването от скоростта на вятъра и неговата продължителност. Това бе направено за случаите от първия зимен сезон, а резултатите са представени на фиг. 80. и показват коефициент на корелация от 0.96.

След това осреднените стойности на интензивността на процеса бяха сравнени с две предложения за оценка на заскрежаването чрез скоростта на вятъра – формула 39 и една подобна, предложена от Тамелин и Сенти [44]. Това е представено на фиг. 81. Вижда се, че точките от графиката се

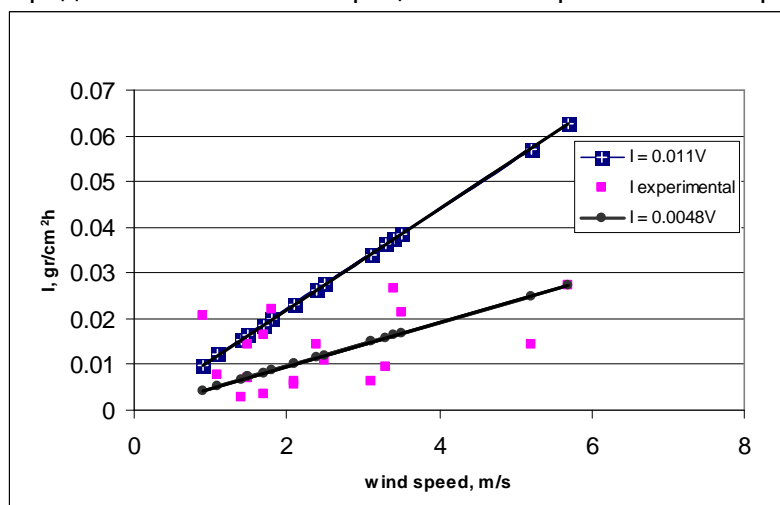
съгласуват много по-добре с втората зависимост  $I = 4.8 \times 10^{-3} V$ . Получената в случая е  $I = 4.4 \times 10^{-3} V$ .



Фиг. 79. Моделна оценка на случая с преохладен валеж от 22.12.2012



Фиг. 80. Зависимост между масата на отложението и произведението на продължителността на процеса със скоростта на вятъра



Фиг. 81. Сравняване на получената зависимост между интензивността на обледяването и скоростта на вятъра за станция Оберцралбах и описаните в текста други две

В параграф 5.2. са коментирани резултатите от оценката на обледяването на цилиндри с различни диаметри в района на Черни връх, извършена върху специализирани експериментални данни в района на Черни връх. От февруари 1972 г. до месец март 1977 г. на Черни връх (2286 m) са проведени изследвания от наблюдателя Драгомир Янев по методика на Светослав Станев върху заскрежаването на пластмасов и на алуминиев цилиндър с диаметри 50 cm и пластмасова тръба с диаметър 3 cm. Първите два цилиндъра са с височина 75 cm, а тръбата е 100 cm. Измерванията са правени посредством специално разграфен шиш перпендикулярно на оста на цилиндъра в няколко точки, а плътността на отложения скреж е получена от регулярните наблюдения на скрежомерния станок. Отбелязано е и каква част от цилиндрите е заскрежена. Подробно описание на измерванията е дадено в дисертацията.

Оказва се, че формата на отложението върху цилиндрите е достатъчно сложна, но най-често наподобява седло на кон, а големината на заскрежената площ – различна. В таблица 38. са представени осреднени вертикални профили и хоризонтални срезове на дебелината на скрежа върху цилиндрите.

**Таблица 38.** Осреднена дебелина (cm) на отложението в точките на измерване за различни месеци

цилиндър	PVC						Al						N
профил	вертикален			хоризонтален			вертикален			хоризонтален			Брой измервания
месец	(1)	(3)	(2)	(3a)	(3)	(3b)	(1)	(3)	(2)	(3a)	(3)	(3b)	
Декември, 1973	16	4	12	8	4	8	21	4.5	20	10	4.5	10	8
Ноември, 1974	28	10	28	15	10	15	30	7	32	18	7	18	3
Януари, 1976	15	4	13	6	4	6	12	2.5	13	5	2.5	5	6

По време на експерименталната работа на Черни връх средната скорост на вятъра е 13,6 m/s, а средната температура на въздуха е била – 7.0 °C. Тези

условия са сходни с експерименталните изследвания проведени от Ленгмюр и Блоджет [1] – на надморска височина 1900 m. Поради това в работата бе възприета същата стойността на коефициента на динамичен вискозитет, а за плътността на въздуха на Черни връх сме използвали стойността  $\rho_a = 0,97 \text{ kg/m}^3$  получена по барометричната формула. Тези стойности са използвани за оценка на критичния радиус на капчиците за цилиндри с диаметър 50 cm, и се установи, че той е 13  $\mu$ . Това означава, че върху цилиндрите инерционно са се отлагали само капчици с радиус по-голям от 13  $\mu$ . Предишни изследвания върху разпределението на радиуса на капчиците на мъглата на Черни връх при заскрежаване показват, че само 4-5 % от спектъра ще се отложи върху цилиндрите. За описване на коефициента на отлагане  $\alpha_1$  са използвали част от резултатите от [1] – формули 76 и 77 в дисертацията. Относителната повтораемост на стойностите на експериментално получения коефициент на отлагане за двата цилиндъра е дадена в таблица 41, а стойностите на  $\alpha_1$  при някои екстремни заскрежавания са представени в таблица 44. Вижда се, че независимо от различията в материала и височината им над земната повърхност, средната стойност на коефициента на отлагане върху двата цилиндъра е почти една и съща. За алуминиевия тя е 0,020, а за PVC цилиндъра е 0,021.

**Таблица 41.** Относителна повтораемост (%) на коефициента на отлагане  $\alpha_1$  за PVC и за алуминиевия цилиндър

$\alpha_1$	0.0010- 0.0100	0.0101- 0.0200	0.0201- 0.0300	0.0301- 0.0400	0.0401- 0.0500	0.0501- 0.0600	0.0601- 0.0700	0.0701- 0.0800
PVC	26.3	34.2	18.5	7.9	6.6	3.9	2.6	0
Al.	38.3	23.3	16.7	10.0	5.0	1.7	3.3	1.7

Оказва се, че възприетата в нашите изследвания формула (77) е неприложима за цилиндрите. Ето защо я преработихме, като константата (0.5) в нея бе определена при средна стойност на коефициента на отлагане  $\alpha_1 = 0.02$

$$\alpha_1 = \left( \frac{K}{K + 0,1} \right)^2 \quad (78)$$

За цилиндрите предложеният от Финстад подход (формула 17) не е използван, тъй като при средни метеорологични условия по време на експеримента  $K$  е значително под критичната стойност 0.125. Този подход обаче бе използван за пресмятане на коефициента на отлагане върху пластмасовата тръба с диаметър 3 cm и резултатите са дадени в таблица 43.

**Таблица 43.** Измерен (първа колона) и пресметнат (последните три колони) радиус с различни формули за  $\alpha_1$  (трета – пета колона) за пластмасовата тръба

Дата	R, cm	$\alpha_{0.5}$	$\alpha_{\pi/2}$	$\alpha_{\text{Finstad}}$	$R_{\alpha 0.5}$	$R_{\alpha \pi/2}$	$R_{\alpha \text{Finstad}}$
09.03.1972	1.8	0.141	0.068	0.062	1.8	1.7	1.6
08.02.1973	2.0	0.126	0.056	0.049	1.7	1.6	1.6
17.02.1973	6.7	0.232	0.153	0.137	5.6	4.2	3.9
05.04.1973	2.3	0.160	0.085	0.077	2.6	2.1	2.0
17.11.1973	4.2	0.201	0.123	0.114	4.1	3.1	3.0
04.12.1973	8.7	0.155	0.081	0.070	8.6	5.2	4.7
22.01.1974	8.9	0.084	0.022	0.012	9.4	3.5	2.7
11.03.1974	2.4	0.099	0.033	0.024	2.6	1.9	1.8
04.11.1974	11.6	0.144	0.071	0.061	10.2	5.8	5.2
22.12.1974	6.4	0.086	0.023	0.014	6.8	2.9	2.4
27.01.1975	2.4	0.093	0.029	0.020	2.2	1.7	1.7
29.03.1975	4.7	0.256	0.177	0.159	4.5	3.6	3.4
12.04.1975	4.0	0.154	0.080	0.068	3.8	2.7	2.5
19.04.1975	2.8	0.114	0.046	0.038	2.7	2.0	1.9
28.01.1977	4.7	0.211	0.132	0.120	4.2	3.2	3.1

Беше изследвана също и зависимостта на интензитета на скрежоотлагане от скоростта на вятъра. За цилиндрите осреднената зависимост е много близка до установената в [44] и има вида

$$I = 3.6 \cdot 10^{-3} V, \quad (79)$$

но е с много нисък коефициент на корелация (0.24) и са необходими допълнителни изследвания.

В таблица 44. са представени параметрите на някои екстремни отложения върху цилиндрите – средна дебелина, маса, коефициенти на отлагане и метеорологичните условия, при които са се формирали – температура на въздуха, скорост на вятъра, хоризонтална видимост в мъглата и продължителност на процеса.

**Таблица 44.** Параметри и метеорологични условия при някои от най-силните заскрежавания върху големите цилиндри

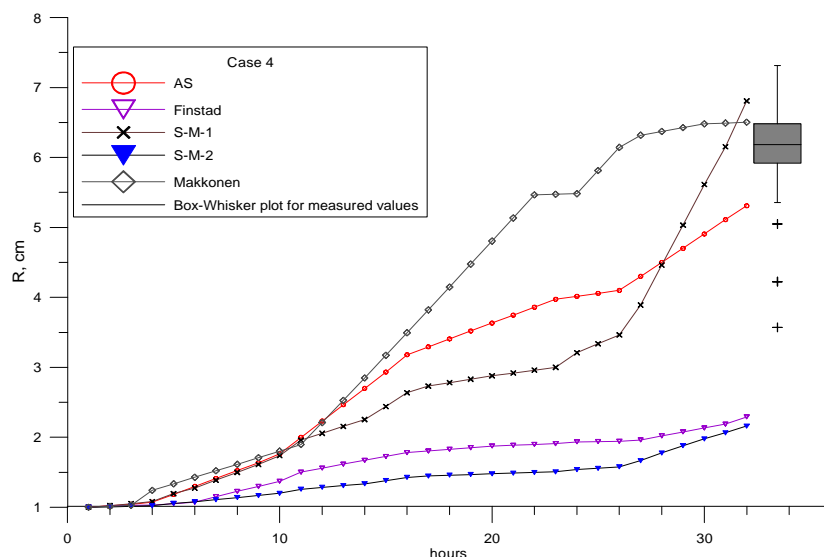
Дата	$\Delta R_m$ , cm		заскрежена площ		- t °C	V, m/s	хор. вид., m	L, (час., мин.)	M <sub>PVC</sub> , kg	M <sub>Al.</sub> , kg	$\alpha_{PVC}$	$\alpha_{Al.}$
	PVC	Al.	PVC	Al.								
22.01.1974	25.4	35.8	1/3	1/2	9.9	16.3	33	111,45	24.0	29.0	0.014	0.016
08.02.0974	20.9	32.0	1/3	1/3	5.8	17.7	38	109,15	25.5	45.3	0.015	0.027
04.11.1974	8.8	19.6	1/3	1/2	7.4	17.4	38	89,40	15.4	40.7	0.012	0.030
27.11.1974	19.1	30.6	1/3	1/2	3.4	13.1	34	78,00	28.0	52.3	0.029	0.053
09.12.1974	12.2	62.8	2/3	3/3	7.9	10.7	40	182,05	34.0	211.3	0.021	0.130
04.12.1976	40.7	30.6	1/3	1/3	4.3	20.8	33	67,15	72.4	48.4	0.054	0.036
09.12.1976	21.4	19.4	1/3	1/3	4.8	16.4	43	44,40	34.8	31.4	0.058	0.053

В заключение може да се каже, че резултатите от тези експериментални изследвания съвпадат добре с теоретичните, получени от Ленгмюр и Блоджет [1] и представени от тях в табличен вид като функции на K и  $\phi$  (формули 9 и 11 от Глава I). При това изследване K бе между 0.144 и 0.256, а  $\phi$  между 10 и 1000. В таблиците на Ленгмюр и Блоджет за съответните стойности пълният коефициент на отлагане е 0.038 и 0.022, а според тези експериментални пресмятания средните стойности за  $\alpha_1$  са 0.0387 и 0.0281 за пластмасовата тръба с диаметър 3 cm и за големите цилиндри съответно. Освен съответствие с количествени резултати, има съвпадение и при оценка на формата на отложението с най-малки стойности за коефициента на отлагане в центъра на големите цилиндри.

В следващия параграф (5.3.) са описани резултатите от сравнителното изследване на методите за оценка на обледяването от мокър сняг. Описаните в параграф 2.3. пет практически метода са използвани за пресъздаване на натоварванията от мокър сняг в пет случая на аварии по електропреносната мрежа в България, а резултатите от тях са сравнени, за да се оцени качеството им. Експерименталните данни за диаметъра и масата на отложенията, с които се сравняват моделните резултати, са набирани от Националната електрическа компания (НЕК) в рамките на двустранно сътрудничество с НИМХ. По измерените величини след това е лесно да се определи и плътността на отложенията. По този начин са регистрирани 25 случая на аварии за период от

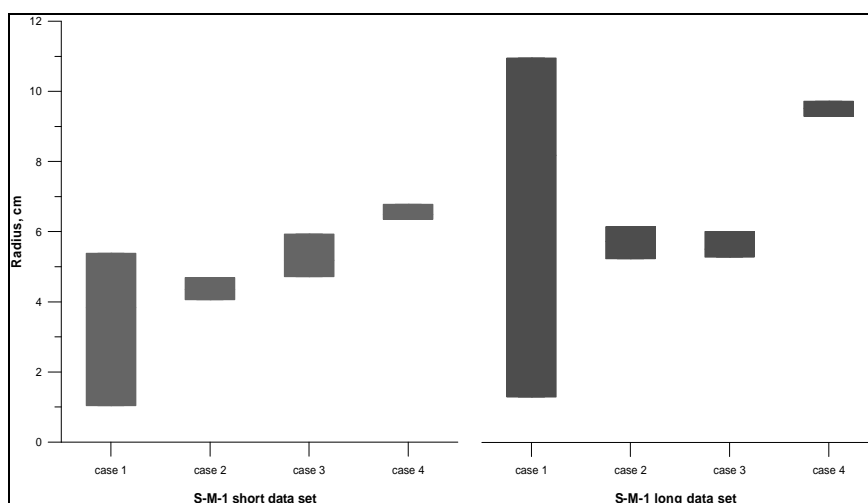
27 години (1969 – 1995). От тях първоначално бяха подбрани четирите случая с най-много налични данни. Освен избраните 4 стари случая в изследването бе включена още една авария, която се случи по време на подготовката на данните за обработка. Това е аварията от 06 – 07 януари 2012 г., когато силна снежна буря обхвана почти цялата страна. За съжаление, въпреки аварията на много места, никъде няма информация за диаметрите или масите на отложенията, или поне не е публично достъпна. Единствено от Електроенергийния системен оператор (ЕСО) бяха изпратени няколко снимки от аварията, които позволяват косвена оценка поне на диаметъра на отложението. В още един от изследваните случаи няма данни за масата на отложенията и затова в тези два случая за оценка на плътностите им са използвани препоръчаните в моделите зависимости. В останалите три случая е използвана експериментално установената плътност. Възможността да се работи с известна плътност позволява фокусирането върху другите параметризации в моделите – ефикасността на прилепване и течното водно съдържание във въздуха. Освен това моделите бяха тествани и по отношение на две промени във входните данни – трансформация във времевата резолюция на данните (от тричасова в едночасова) и промяна на горните температурни лимити там, където се използват. Всички пресмятания са направени за проводник с диаметър 2 cm и предположение за посока на вятъра, перпендикулярна на електропроводната линия. Използваните метеорологични станции са Смолян, Кърджали, Чирпан и Габрово.

Първоначално бе направен подробен анализ на използваните в моделите зависимости, като част от тях бяха представени графично. След това първите четири случая са пресметнати с всички от описаните в параграф 2.3. модели за мокър сняг, като веднъж това е направено с оригиналните тричасови данни, а впоследствие и с трансформирани в ежечасни. Получените резултати са сравнени и таблично, и графично. На фигура 95. като пример е показано графичното сравнение на кривите на изменение радиуса на отложението според петте модела, както и измерените стойности във вид на бокс-плот за четвъртия от изследваните случаи (27-30.12.1989).



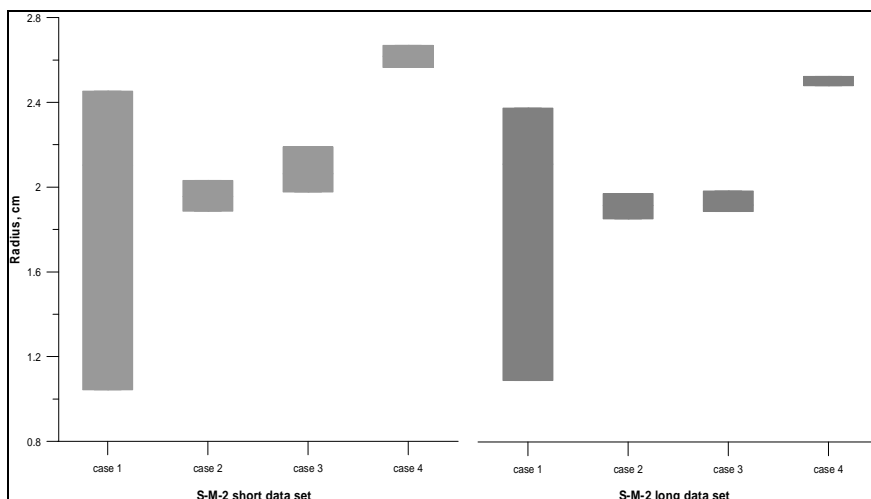
**Фиг. 95.** Графично представяне на моделните симулации за случай № 4

Следваща стъпка бе да се оцени влиянието на промяната на горните температурни лимити в двата модела на Сакамото и Миура [41]. За целта първите четири случая са пресметнати за четири различни температурни лимита – 1, 2, 3, и 4 °C за двете редици от данни (тричасови и ежечасни). Така бяха оценени относителните изменения както в радиусите и диаметрите, така и в коефициента на прилепване за различните горни температурни лимити. На фигури 102. и 103. са представени резултатите за двата модела във вид на колонки, които представляват диапазоните на пресметнатите радиуси с различните температурни лимити и изменението им при промяна на данните от тричасови в ежечасни.



**Фиг. 102.** Графично сравнение на резултатите за радиусите за първия модел на Сакамото и Миура за различните температурни лимити за тричасовата (вляво) и ежечасната (вдясно) редица данни





**Фиг. 103.** Графично сравнение на резултатите за радиусите за втория модел на Сакамото и Миура за различните температурни лимити за тричасовата (вляво) и ежечасната (вдясно) редица данни

Изводите от това изследване са дадени в обобщеното заключение по-долу.

## Заклучение

Настоящият дисертационен труд обобщава изследванията на автора по обледяване на приземни технически съоръжения, осъществени теоретично и експериментално за различни райони в няколко европейски страни и съдържа следните по-значими резултати:

- 1) Актуализирано е климатичното изследване на обледяването в непланинските райони на страната. Установени са следните климатични характеристики на процеса: брой дни и брой случаи на обледяване, период на проявяване, повтораемост по месеци и продължителност на процеса. Освен това са изследвани и метеорологичните условия, когато това явление се проявява, и са намерени средните стойности на следните важни метеорологични величини: температура и относителна влажност на въздуха, скорост и преобладаваща посока на вятъра. На тази база са установени районите, които са най-застрашени от това явление;
- 2) Подобно изследване е направено и за планинските райони на страната, като допълнително тук е включено и изследване на хоризонталната видимост в мъгла при обледяване. Тази величина може да служи за оценка на водността на мъглата, която е важен фактор в моделирането на процеса и при

практическите методи за количествена оценка на отлаганията от лед и скреж;

- 3) В тези райони са установени редица вертикални градиенти на броя случаи, на скоростта на вятъра, на температурата на въздуха, на продължителността на процеса и на повторемостта на обледяването, които намират директно практическо приложение при косвени оценки на степента на обледяване в произволен район от нашите планини. Установено е и едно ниво, където условията за обледяване са най-благоприятни – най-големи продължителности на процеса, най-високи скорости на вятъра и най-ниска хоризонтална видимост – между 2200 – 2400 m н.в.;
- 4) Установено е, че вр. Снежанка се отличава съществено от останалите изследвани планински райони – всички климатични характеристики при обледяване са силно занижени по отношение на надморската височина на станцията в сравнение с останалите планински станции. Така районът на този връх е сравним по-скоро с района на станция Вакарел, отколкото с този на вр. Мургащ, който е с много по-близка да неговата височина;
- 5) Направено е сравнително изследване на условията при обледяване в планинските райони на Словакия и България. Резултатите от него показват, че обледяването в планинските райони на Словакия не е така интензивно и продължително, както е в планинските райони на България. В тези райони нивото, където обледяването е най-често, най-продължително и с най-високи скорости на вятъра, вероятно е разположено на по-ниска надморска височина – между 2000 и 2200 m, докато у нас е с около 200 m по-високо;
- 6) Направено е райониране на страната по натоварване от обледяване за нуждите на НЕК;
- 7) Изследвани са климатичните характеристики на мокрия сняг в Германия и е установено тяхното времепространствено разпределение. За целта са използвани данни за 20-годишен период (1980-1999) от 70 метеорологични станции в Германия и критерият на Макконен за разпознаване на валежа от мокър сняг;
- 8) Направена е и първоначална количествена оценка на отложенията от мокър сняг в Германия и са определени стойностите с различни периоди на повторение. За първото е използван моделът на Макконен, а за – второто

разпределението на Гумбел и два метода за определяне параметрите на разпределението – методът на най-малките квадрати и методът на максималното правдоподобие;

- 9) Направена е субективна класификация на синоптичните обстановки при обледяване от преохладени валежи в България и са открити 4 основни типа;
- 10) Използвани са и две други класификации – една комбинирана и една обективна, базирана на клъстерен анализ с две разновидности в зависимост от избора на метода за първоначално разделяне. Най-добри резултати се получиха с класификацията KMN (кълъстерен анализ), когато на отделните елементи, които се използват за направата на класификацията, се дават различни тегла. В случая най-добрите постигнати резултати са за KMN класификация със следните тегла на елементите: приземно барично поле – 2; количество валеж – 1; температура на 850 hPa – 1 и обледяване – 0,03. Прави впечатление, че и при тази обективна класификация се откриха четири групи, колкото и при субективната класификация, като основната от тях е почти еднаква и при двата вида класификации;
- 11) Направени са подробни пресмятания по модела на Станев и Моралийски [32 и 33], с използването на някои нови предложения за коефициента на сблъскване по експериментални данни за заскрежаване на цилиндри от 1972 г. до 1977 г. на Черни връх. Резултатите от тези пресмятания съвпадат добре с теоретичните, получени от Ленгмюр и Блоджет [1] и представени от тях в табличен вид като функции на  $K$  и  $\phi$ . При това изследване  $K$  бе между 0.144 и 0.256, а  $\phi$  между 10 и 1000. В таблиците на Ленгмюр и Блоджет за съответните стойности пълният коефициент на отлагане е 0.038 и 0.022, а според тези експериментални пресмятания средните стойности за  $\alpha_1$  са 0.0387 и 0.0281 за пластмасовата тръба с диаметър 3 cm и за големите цилиндри съответно. Има съответствие и при оценка на формата на отложението с най-малки стойности за коефициента на отлагане в центъра на големите цилиндри. Установена е и критичната стойност на радиуса на капчиците на облаците ( $13 \mu$ ) в района на Черни

върх за цилиндри с диаметър 50 cm, под която не е възможно инерционно отлагане на капките върху обекти с такива размери;

12) Направено бе подробно изследване на описаните в Глава II пет опростени модела и са изведени следните заключения:

- Най-добри резултати показват моделите на Адмирал и кол. [40] и на Макконен [20, 25]. Освен че във всички изследвани случаи техните резултати са близо до измерените стойности, те не се изменят или незначително се изменят при трансформация на входящите данни;
- Резултатите от модела на Адмирал и кол. нямат никакво изменение при трансформация на данните. Това е така, защото този модел зависи само от общото количество валеж, но не и от интензитета му и затова няма значение дали ще се ползват ежечасни измерени данни или такива за по-дълъг период. Това го прави особено полезен за оценка на натоварването от мокър сняг в места, където няма така подробни измервания на валежа като напр. климатични и валежомерни станции;
- Следващият модел с най-малко изменение на резултатите при промяна на времевата резолюция на данните е този на Макконен. Поради силната нелинейна зависимост на този модел от ниски стойности на хоризонталната видимост той трябва да се използва внимателно, когато явлението е придружено от мъгла;
- Вторият от моделите на Сакамото и Миура [41] и този на Финстад и кол. [27] са следващите поред по отношение трансформацията на данните. За съжаление, въпреки демонстрираната стабилност спрямо входните данни, тези модели винаги дават силно занижени резултати;
- Първият от моделите на Сакамото и Миура е силно зависим от избора на температурните лимити и от трансформацията на входящите данни. Особено силно изменение настъпва при високи скорости на вятъра и малки количества валеж. Този модел е и с

най-голямо изменение при трансформация на данните – от 9.6% за случай №3 до 105.4% за първия случай;

- Близките резултати на моделите на Адмирал и кол. и на Макконен би трябвало да означава, че апроксимацията на течното водно съдържание във въздуха, направена по различни методи в двата модела, е вярна. Това важи само за скорост на падане на снежинките от 1 m/s.

## Приноси

Научните претенции в дисертационния труд могат да се обобщят както следва:

1. Направен е подробен преглед на развитието и съвременното състояние на изследванията по проблема, което помогна за използването в практиката на последните постижения в моделирането на различните видове обледявания. При заскрежаването това са съвременните апроксимации за плътността на отложението (параметъра на Маклин) и за коефициента на отлагане, което прави разработения в НИМХ през 70-те години на миналия век модел за заскрежаване модерен и особено ценен при практическа оценка на количеството отложен скреж. При моделирането на обледяването от мокър сняг и преохладени валежи са приложени съвсем нови методи, които преди това са били напълно непознати в българската практика. Освен това натрупаното познание позволи експертно участие в постоянната работната група “Въздействия върху строителни конструкции” на Технически комитет № 56 към Българския институт по стандартизация при окончателното оформяне на българската редакция на международния стандарт ISO 12494 “Атмосферно обледяване на конструкции”;
2. Проведено е райониране на страната по натоварване от обледяване за нуждите на Националната електрическа компания;
3. Направен е подробен времепространствен анализ на мокрия сняг в Германия, като е използван критерият на Макконен за разпознаване на валеж от мокър сняг – нещо, което не бе правено никъде дотогава;

4. Установени са редица вертикални градиенти на различни климатични характеристики на обледяването в планинските райони на Централна Западна България, които са използвани при оценка на това явление и натоварването от него;
5. Експериментално и теоретично са получени коефициентите на отлагане върху пластмасов и алуминиев цилиндър с диаметър 0.5 m, като модифицирана версия на коефициента на отлагане по Лангмюр и Блоджет е проверена върху независим материал;
6. Практическите методи за обледяване от мокър сняг, описани в параграф 2.3. са подробно изследвани и оценени в реални случаи, като са установени техните недостатъци и предимства.

## Списък на публикации, свързани с дисертационния труд

### Публикации в научно списание

Моралийски Е. и **Д. Николов**, „Натоварване от обледяване на територията на България”, Строителство, бр. 1, 2007, ISSN 0562-1852;

Моралийски Е. и **Д. Николов**, „Заскрежаване на цилиндрични елементи в планински условия”, Строителство, бр. 1, 2006, ISSN 0562-1852;

Dobesch H., **D. Nikolov**, L. Makkonen, „Physical processes, modelling and measuring of icing effects in Europe”, Austrian Contribution to Meteorology and Geophysics, vol. 34, 2005, ISSN 1016-6254;

Latinov L. **D. Nikolov**, “A study of the synoptic situation during the heavy icing in North Bulgaria in the period 20-30 of November 1998”, ВЖМН, 2001, vol. 12, № 3-4;

**Nikolov D.**, E. Moraliiski, “Meteorological Conditions by Rime-Icing in the Mountains of Bulgaria”, ВЖМН, 2000, vol. 11, № 3-4;

Moraliiski E., **D. Nikolov**, “Оценка на заскрежаването на метални проводници в района на Ботев връх”, Bulgarian Journal of Meteorology and Hydrology (ВЖМН), 1998, vol. 9, №3.

### Доклади, публикувани в пълен текст в сборници на конференции

**Nikolov D.** and B. Wichura, “Analysis of spatial and temporal distribution of wet snow events in Germany”, Proc. of the 13th IWAIS, 8-11.9.2009, Andermatt, Switzerland;

Ostrožlík M., **D. Nikolov** and E. Moraliiski, “Relation between atmospheric icing and some meteorological characteristics at high-mountain sites in Slovakia and Bulgaria”, Proc. of the 13th IWAIS, 8-11.9.2009, Andermatt, Switzerland;

**Nikolov D.**, P. Ivanov and E. Moraliiski, "Variability of wind energy outputs in relation with the weather and climate impacts in Bulgaria", Proc. of the Winterwind Conference, 9-10.12.2008, Norrköping, Sweden;

Moraliiski E. and **D. Nikolov**, "Rime-icing of large cylindrical elements in mountainous conditions", Proc. of the 12th IWAIS, 9-12.10.2007, Yokohama, Japan;

Dobesch, H., **D. Nikolov**, "Icing measurements and model results from Oberstrahlbach, Austria", Proc. of 7-th Cold Climate Conference, BOREASVII 7-8.03.2005, Saariselkä, Finland, ISBN 951-697-643-3;

Latinov L. **D. Nikolov**, "A study of the synoptic situation during the heavy icing in north Bulgaria in the period 20-30 of November 1998", Proc. of the 10th IWAIS, 17-20.06.2002, Brno, Czech Republic;

## **Доклади с публикувани разширени резюмета в сборници на конференции**

Latinov L. and **D. Nikolov**, "Synoptic conditions for black ice and icing in Bulgaria", Proc. of COST 733 Mid-term conference, 22-25.10.2008, Krakow, Poland;

**Nikolov D.**, E. Moraliiski, "Meteorological Conditions in Cases of Rime Icing in the Mountain Region of Bulgaria", Proc. of 26th International Conference on Alpine Meteorology (ICAM 2000), Innsbruck, Austria, Austrian Contribution to Meteorology and Geophysics, vol. 23, 2000, ISSN 1016-6254;

**Nikolov D.**, E. Moraliiski, "Icing and Damages on Technical Equipment on the Territory of Bulgaria", Proc. of 4th European Conference on Applied Meteorology (ECAM1999), 13-17.09, 1999, Norrköping, Sweden;

Moraliiski E., **D. Nikolov**, "Rime-icing on Technical Equipment in the Mountain Regions of Bulgaria", Proc. of 2nd European Conference on Applied Climatology (ECAC 1998), 19-23.10.1998, Vienna, Austria, Austrian Contribution to Meteorology and Geophysics, vol. 19, 1998, ISSN 1016-6254.

## **Непубликувани доклади от конференции и семинари**

**Nikolov D.**, "Theoretical and experimental investigations of the wet snow process in field and laboratory conditions" – invited presentation for the kick-off conference "Bulgaria-Japan Research Collaboration for Sustainable Development", 18-20.03.2013, Science Council of Japan, Tokyo;

**Nikolov, D.**, Plamen Neytshev, "Circulation types associated with freezing precipitation in Bulgaria", COST Action 733 Harmonisation and application of weather type information classifications in Europe – Final Workshop, 22-24.11.2010, Vienna, Austria;

**Nikolov D.**, E. Moraliiski, "Icing research in Bulgaria", Open International Workshop "Icing on structures" in frame of COST Action 727 "Measuring and forecasting atmospheric icing structures", 29 November 2005, Sofia, Bulgaria;

**Николов Д.**, „Обледяване на технически съоръжения на територията на България и самолети над Централна Европа”, 5-ти зимен семинар на младите учени и докторанти, 13-15.12.2002, станция на БАН – Витоша.

## Списък на цитираната в автореферата литература

- [1] Langmuir, I. and K. B. Blodgett (1946): A mathematical investigation of water droplet trajectories. In *Collected works of Irving Langmuir*, vol. 10, pp. 335-393. Oxford, Pergamon press.
- [2] Мазин И. П., *Физические основы обледенения самолетов*, Гидрометеиздат, М., 1957.
- [3] Ludlam, F. H. (1951): The heat economy of a rimed cylinder. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 77, 663-666.
- [4] Ludlam, F. H. (1958): The hail problem. *Nubila*, 1, p.13.
- [5] Messinger, B. L. (1953): Equilibrium temperature of an unheated icing surface as a function of air speed. *J. Aeronaut. Sci.*, 20, 29-42.
- [6] Macklin, W. C. (1961): The density and structures of ice formed by accretion. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 88, 413-424.
- [7] Macklin, W. C. and G. S. Payne (1967): A theoretical study of the ice accretion process. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 93, 195-213.
- [8] Wakahama, G., 1979. Experimental studies of snow accretion on electrical lines developed in a strong wind. *J. Nat. Disaster Sci.*, 1: 21-23.
- [9] Colbeck S.C. and Ackley, S.F., 1983. Mechanisms for ice bonding in wet snow accretions on power lines. *First Int. Workshop Atmospheric Icing of Structures*, Hanover, N.H. (1982), U.S. Army CRREL Spec. Rep., 83-17: 25-30.
- [10] Соломатина И. И. Расчет интенсивности обледенения проводов на высотах по наземным данным. *Труды ГГО*, вып. 57 (119), 1956.
- [11] Бучинский В. Е., *Гололед и борьба с ним*. Гидрометеиздат, Л., 1960.
- [12] Раевский А. Н., Влияние особенностей рельефа на распределение гололедных отложений. *Труды ГГО*, вып. 122, 1961.
- [13] Руднева А. В., *Гололед и обледенение проводов на территории СССР*. Гидрометеиздат, Л., 1961.
- [14] Глухов В. Г. Метеорологические условия образования гололеда на высотных сооружениях. *Труды ГГО*, вып. 311, 1972.
- [15] Заварина М. В., Ломилина Е. Влияние холмистого рельефа на вес и толщину стенки гололеда. *Труды ГГО*, вып. 379, 1976.
- [16] Lozowski, E.P., Stallabrass, J.R. and Hearty, P.F. 1983. The icing of an unheated nonrotating cylinder. Part I: A simulation model. *Journ. Clim. Appl. Met.* 22, 2053-2074.
- [17] Makkonen, L. (1985): Heat transfer and icing on a rough cylinder. *Cold Regions Science and Technology* 10, 105.
- [18] Makkonen, L. and J. R. Stallabrass (1987): Experiments on cloud droplet collision efficiency of cylinder. *J. Climate Appl. Meteor.* 26, 1406-1411.
- [19] Makkonen, L. (1988): A model of icicle growth. *J. Glaciol.* 34, 64-70.



- [20] Makkonen, L., 1989. Estimation of wet snow accretion on structures. *Cold Regions Science and Technology*, 17(1): 83-88.
- [21] Makkonen, L., 1992. Analysis of rotating Multicilinder data in Measuring Cloud-Droplet Size and Liquid Water Content. *Atmos. and Oceanic Technology*, vol. 9, No. 3, 258-263
- [22] Makkonen, L., K. Ahti (1995): Climatic mapping of ice loads based on airport weather observations. *Atmos. Res.* 36, 185-193.
- [23] Makkonen, L. (1998): Modelling power line icing in freezing precipitation. *Atmos. Res.* 46, 131-142.
- [24] Makkonen, L., 2000. Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet-snow on structures, *Phil. Trans. R. Soc. London. A*, 358, 2913-2939.
- [25] Makkonen L. and B. Wichura, 2010: Simulating wet snow loads on power line cables by a simple model. *Cold Regions Science and Technology*, 61: 73-81
- [26] Finstad, K. J., E. P. Lozowski and L. Makkonen (1988): On the median volume diameter approximation for droplet collision efficiency. *J. Atmos. Sci.* 45, 4008-4012.
- [27] Finstad K., S. Fikke and E. Magnar, 1988. A comprehensive deterministic model for transmission line icing applied to laboratory and field observations. *Proc. Fourth Int. Workshop on Atmospheric Icing of Structures. IWAIS, Paris, France*
- [28] Finstad, K. J., E. P. Lozowski and E. M. Gates (1987): A computational investigation of water droplet trajectories. *J. Atmos. Oceanic Tecjnl.* 5, 160-170.
- [29] Jones, K. F. (1996): Ice accretion in freezing rain. *US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory Report*, 1-22.
- [30] Taylor, G.I. (1940): Notes on possible equipment and technique for experiments of aircraft. *Aeronaut.Res.Comm.Rep.No.4350*.
- [31] Ahti, K. and L. Makkonen (1982): Observation on rime formation in relation to routinely measured meteorological parameters. *Geophysica* 19, 75 85
- [32] Станев Св., Ст. Стоянов, Върху някои въпроси на заскрежаването при планински условия, *Хидрология и метеорология*, кн. 6, 1970.
- [33] Станев Св., Е. Моралийски, К. Велчев, Заскрежаване на електропроводите в планински условия. *Проблеми на метеорологията и хидрологията*, 2, 1987.
- [34] Harstveit, 2009: Using Metar-data to calculate in-cloud icing on a mountain site near by the airport. *XIII International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IW AIS)*, 8-11 September, 2009, Andermatt, Switzerland, *Proceedings*
- [35] Imai, I. 1953. *Studies of Ice Accretion. Res. Snow Ice* 1, 35-44.
- [36] Lenhard, R.W., An indirect method for estimating the weight of glaze on wires. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, vol. 36, 1955.
- [37] Chainé, P. M. and G. Castonguay, 1974. New approach to radial ice thickness concept applied to boudle-like conductors, *Industrial Meteorology-Study IV*, Environment Canada, Toronto, 11 pp.
- [38] Goodwin, E. J. Mozer,, J. D., Di Gioia, A. M., Jr., Power, B. A., 1983. Predicting ice and snow loads for transmission lines. *Proc. of 1st IW AIS*, pp. 297-273.
- [39] Sudin, E. and L. Makkonen (1998): Ice loads on a lattice tower estimated by weather station data. *J. Appl. Meteor.* 37, 523-529.

- [40] Admirat, P., Sakamoto, Y., De Goncourt, B., 1986a. Calibration of a Snow Accumulation Model Based on Actual Cases in Japan and France. Proc. Fourth Int. Workshop on Atmospheric Icing of Structure. IW AIS, Paris, France, pp. 129-133.
- [41] Sakamoto, Y. and A. Miura, 1993. Comparative study of wet snow models for estimating snow load on power lines based on general meteorological parameters. Proc. Sixth Int. Workshop on Atmospheric Icing of Structures. IW AIS, Budapest, Hungary.
- [42] Stallabrass, J.R., 1978. Airborne Snow Concentration and Visibility. Second Int. Symp. Snow Removal and Ice Control Research. Hanover, N.H., U.S. Army CRREL, pp. 192-199.
- [43] Beck, C., Jacobeit, J., and Jones, P. (2007). Frequency and within-type variations of large scale circulation types and their effects on low-frequency climate variability in central europe since 1780. Int. J. Climatology, 27:473–491.
- [44] Tammelin, B. and Kr. Säntti (1996): Estimation of rime accretion at high altitudes – preliminary results., Proc. of BOREAS III meeting, Finish Meteorological Institute.

## Благодарности

Тук е мястото да изкажа благодарност на някои от онези колеги и институции, които ме подкрепяха по време на написването на тази дисертация и ми помогнаха за осъществяването на описаните изследвания.

Това са:

- проф. д-р Ласе Макконен – за изцяло добронамереното отношение и пълно съдействие при обсъждането на всякакви въпроси, свързани с теоретичното описание на процеса на обледяване и експерименталното му изследване;
- на доц. д-р Емил Моралийски – за консултациите му по приложна климатология и безценния архив по обледяване, който ми предостави още от първия работен ден;
- на д-р Светослав Станев (посмъртно) – за изключително акуратните му и все още съвременни изследвания и измервания, без които написването на тази работа би било невъзможно;
- на проф. дн Владимир Шаров (посмъртно) – за това, че ме прие на работа в НИМХ и ми гласува доверие като научен сътрудник;
- на доц. дн Латин Латинов (посмъртно) – за консултациите му по синоптика;
- на господин Свейн Фике, независим метеорологичен консултант – за ценните съвети и обяснения свързани с обледяването на

електропроводи, както и за снабдяването ми с трудно откриваеми литературни източници;

- на господин Бен Бърнстейн за консултациите му по преохладени валежи, авиационно обледяване и прогноза на явлението;
- на проф. Томас Хауф за консултациите по авиационно обледяване и съдействието му в планове ми за внедряване на системата ADWICE в НИМХ;
- на Немската служба за академичен обмен (DAAD) за отпуснатите две стипендии и неоценимата ѝ програма за научна литература;
- на Австрийската служба за академичен обмен (ÖAD) за отпуснатата стипендия „Ернст Мах“;
- на програма COST за възможностите за обмен на знание, които предоставя и за подпомагането на младите учени – в случая и за финансираните три краткосрочни научни мисии;
- на метеорологичните наблюдатели от вр. Мургаш и вр. Ботев и специално на Георги Златанов и Явор Бонев за съдействието при изпълнението на двустранния проект със Словакия;
- на колегите от секция “Климатология и метеорологична база данни” за подкрепата и съдействието.