

დიდმასშტაბიან გაზოვან დეტექტორებში თერმული თვითრეგულაციის მექანიზმები

ზვიად წამალაიძე¹; ოთარ კემულარია²; იური ბაღათურია³; სალომე ვაშაკიძე⁴

¹მეცნიერებათა დოქტორი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, საქართველო, 0160, თბილისი, მ. კოსტავას 77, E-mail: zviadi.tsamalaidze@cern.ch Tel: +995741775; ²მეცნიერებათა დოქტორი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, საქართველო, 0160, თბილისი, მ. კოსტავას 77, E-mail: oto.kemularia@gmail.com Tel: +995568821788; ³ასოცირებული პროფესორი, ილიას სახელმწიფო უნივერსიტეტი, საქართველო, 0162, თბილისი, ი. ჭავჭავაძის გამზირი 45, E-mail: iuri.bagaturia@cern.ch Tel: +995593781142; ⁴სტუდენტი (დოქტორანტურა), საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, საქართველო, 0160, თბილისი, მ. კოსტავას 77, E-mail: salo_vashakidze@ymail.com Tel: +995593644597

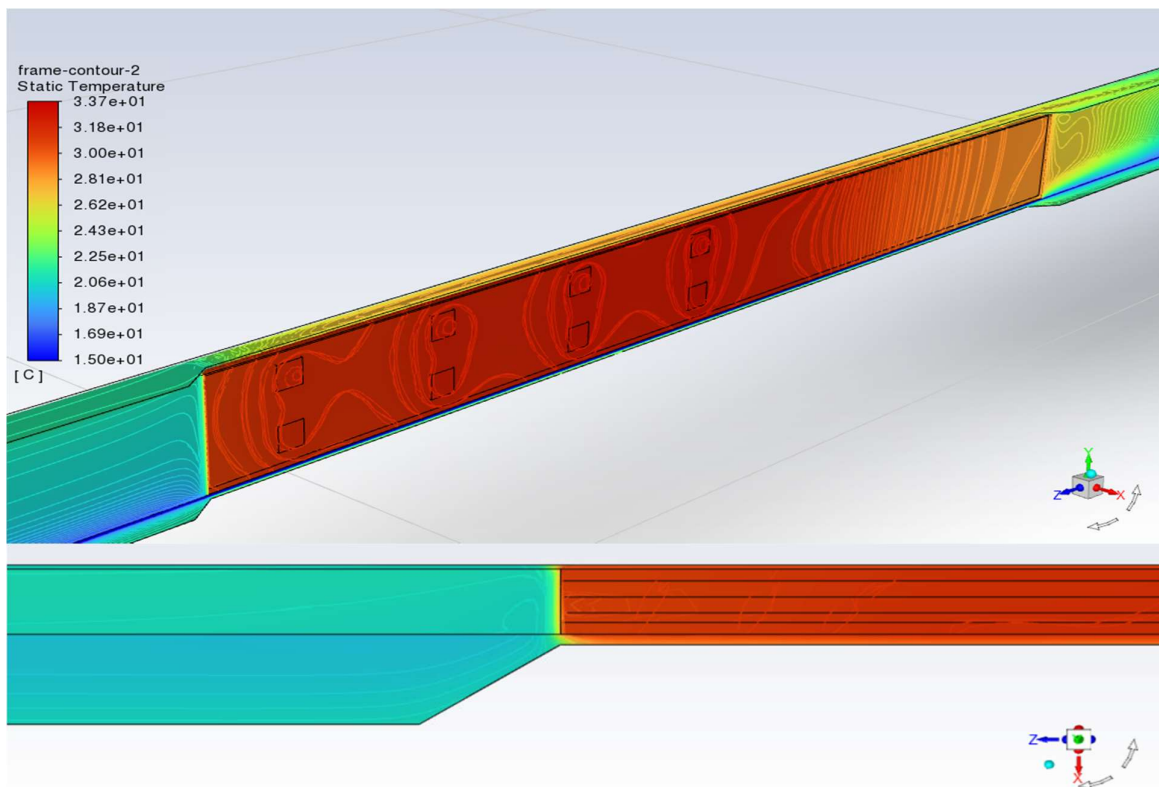
კატეგორია: საინჟინრო მეცნიერებები

რეზიუმე

სტატიაში განხილულია დიდმასშტაბიან გაზოვან დეტექტორებში თერმული თვითრეგულაციის მიდგომა, რომელიც ეფუძნება დეტექტორის შიდა იონიზაციის აირის გამოყენებას ინტეგრირებული წინა ნაწილის (FE) ელექტრონიკის მიერ წარმოქმნილი სითბოს ეფექტურად მოსაშორებლად. კვლევა მოიცავს სტროუ-ტუბის ტრეკერის თერმულ ანალიზს, გაზის ნაკადისა და გეომეტრიული პარამეტრების ოპტიმიზაციას და სიმულაციური შედეგების ექსპერიმენტულ ვალიდაციას. მიღებული შედეგები აჩვენებს, რომ აირების CO₂-ს შემცველი ნაზავის გამოყენებით შესაძლებელია ელექტრონული კომპონენტების სამუშაო ტემპერატურის 40°C-მდე შემცირება დაბალი გაზის სიჩქარის პირობებში, რაც უზრუნველყოფს დეტექტორის კონსტრუქციის გამარტივებას, მასალის რაოდენობის შემცირებას და თერმული მართვის ეფექტიან ალტერნატივას მაღალი ენერგიების ფიზიკის ექსპერიმენტებისთვის.

საკვანძო სიტყვები: გაზოვანი დეტექტორი, თერმული მართვა, სტროუ-ტუბის ტრეკერი, გაგრილების ოპტიმიზაცია, მაღალი ენერგიების ფიზიკა

შესავალი. მაღალი ენერგიების ფიზიკის ექსპერიმენტებში, ნაწილაკებზე დასაკვირვებლად და მისი რეგისტრაციის მეთოდოლოგიისთვის გამოიყენება გაზური



სურ. 1 თერმული განაწილება დეტექტორის გეომეტრიაზე სიმულაციაში. დეტალებისთვის იხ. ტექსტი

განმუხტვის დეტექტორები. სტატიაში განხილულია, შიდა იონიზაციის აირის გამოყენების შესაძლებლობა, როგორც გამაგრებელი სითხის, ინტეგრირებული წინა ნაწილის (FE) წამკითხავი ელექტრონიკის მიერ წარმოქმნილი თერმული დატვირთვის ეფექტურად მოსაშორებლად. ტექნიკა ეფუძნება ოპტიმიზებული სითხის ნაკადს და გამოიყენება თანამედროვე დაბალი სიმძლავრის ელექტრონიკაში. უპირატესობებს წარმოადგენს დეტექტორის კონსტრუქციის გამარტივება, საერთო მასალის რაოდენობის შემცირება თრექინგ-დეტექტორის გარშემო, დაბალი ბიუჯეტი, აგრეთვე შემცირებული ხარჯები. ვიკვლევთ, სტროუ-ტუბის ტრეკერს და შესაბამისი გაგრილების პარამეტრების თერმული ანალიზის საფუძველზე ვაკეთებთ ოპტიმიზაციას. შედეგები აჩვენებს, რომ ელექტრონული კომპონენტების ეფექტური გაგრილება შესაძლებელია მაქსიმალური სამუშაო ტემპერატურის 40°C-მდე შემცირებით, გამოიყენება აირების ნაზავი, რომელიც შეიცავს CO₂-ს მაქსიმუმ 30%-მდე შედარებით დაბალი სიჩქარის გაზის პირობებში.

I. ძირითადი ნაწილი

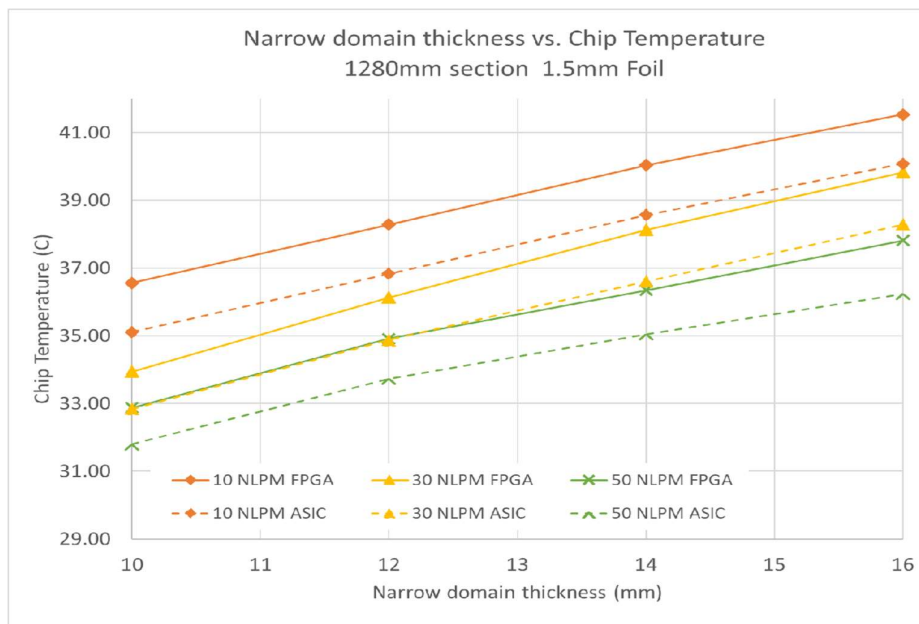
გაზური განმუხტვის დეტექტორები თანამედროვე მაღალი ენერგიების ფიზიკის ექსპერიმენტის აუცილებელი კომპონენტია. აქ გამოიყენება გაზში იონიზაციის წარმოქმნა მისი სამუშაო მოცულობის დამუხტული ნაწილაკის მიერ გადაკვეთის დროს [1]. სენსორულ ელემენტებთან ელექტრონიკის ახლო ინტეგრაციის გამო, ეფექტური თერმული მართვა დიზაინის კრიტიკულად მნიშვნელოვანი ასპექტია.

ტრადიციული გაგრილების სისტემები, რომლებიც დაფუძნებულია სპეციალურ სითხეებზე ან მექანიკურ სტრუქტურაზე, ზრდის კომპლექსურობას, ხარჯებს და ტრეკერის მოცულობაში დამატებითი მასალის შეტანა ხდება. ეს ყველაფერი არასასურველია მრავალჯერადი გაფანტვის მინიმიზაციისა და დეტექტორის მუშაობის პროცესისთვის.

პერსპექტიული ალტერნატივაა დეტექტორის იონიზაციის აირის გამოყენება, როგორც გამაგრილებელი საშუალება. აირის ნაკადის და შემადგენლობის ოპტიმიზაციის გზით, ერთსა და იმავე სისტემას ერთდროულად შეუძლია უზრუნველყოს დეტექტორის სტაბილური მუშაობა და ელექტრონიკის მიერ წარმოქმნილის სითბოს გამონთავისუფლება.

II. დეტექტორის კონფიგურაცია

ტრეკერი დეტექტორის ძირითადი კომპონენტია, რომელიც შექმნილია ნაწილაკების მაღალი სიზუსტით მონიტორინგისა და დაკვირვებისთვის. შედგება თხელი, მსუბუქი სტროუ-ტუბის მასივებისგან, რომელიც შევსებულია იონიზაციის აირით და განლაგებულია იმგვარად, რომ შესაძლებელია ნაწილაკების სამგანზომილებიანი რეკონსტრუქცია.



სურ. 2 ჩიპის ტემპერატურის დამოკიდებულება გარემოს სრული სისქეზე. დეტალები იხილეთ ტექსტში.

თითოეული მასივი შეიცავს სპილენძის ანოდურ მავთულს, რომელიც განთავსებულია ცენტრში და აგროვებს მასში გამავალი ნაწილაკების მუხტს. მაღალი გარჩევადობის შესანარჩუნებლად ელექტრონიკა ჩამკეტებთან მაქსიმალურად ახლოსაა

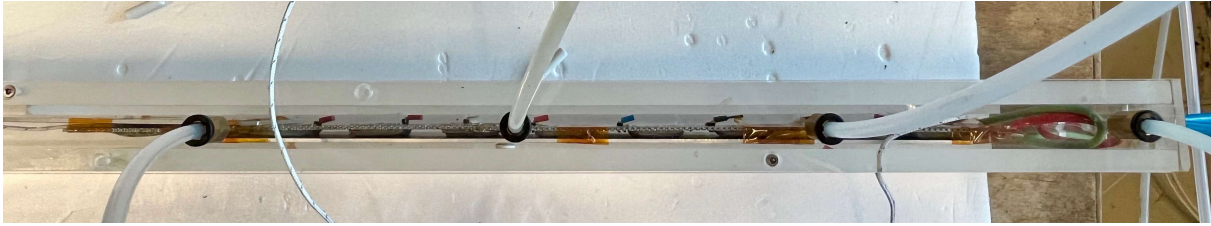
განთავსებული, თუმცა ამგვარი ინტეგრაცია სითბოს მოცილების პრობლემებს წარმოშობს.

დეტექტორში აირის სისტემა უზრუნველყოფს იონიზაციის აირის ცირკულაციას სტროუებში, რაც გვაძლევს შესაძლებლობას, ეს აირი გამოვიყენოთ გაგრილებისთვის. კვლევა ფოკუსირებულია გაზის ნაკადისა და შემადგენლობის ოპტიმიზაციაზე, რათა ეფექტურად მოხდეს სითბოს ართმევა ელექტრონიკიდან და ამავდროულად დეტექტორმა იმუშაოს სრულფასოვნად. სურ.2-ზე მოცემულია ჩიპის ტემპერატურის დამოკიდებულება მჭიდრო გარემოს სისქეზე, სხვადასხვა გაზის ნაკადის სიჩქარისთვის, 1280მმ-იან მონაკვეთში. შედეგები ცხადყოფს, რომ ჩიპის ტემპერატურა სტაბილურად იზრდება ვიწრო გარემოს სისქის მიხედვით როგორც FPGA, ასევე ASIC კომპონენტებისთვის. გაზის ნაკადის მაღალი სიჩქარე უზრუნველყოფს ჩიპის დაბალ ტემპერატურას, რაც მიუთითებს სითბოს მოცილების ეფექტურობას. FPGA ჩიპები ოდნავ მაღალ ტემპერატურას აღწევს ვიდრე ASIC-ი, რაც შესაძლოა გამოწვეულია მაღალი ენერგომომხმარებით ან შემცირებული გაგრილების ეფექტურობით. მთლიანობაში, მონაცემები ადასტურებს ჩიპის ტემპერატურის ძლიერ დამოკიდებულებას, როგორც გაზის ნაკადის სიჩქარეზე, ასევე ვიწრო გარემოს გეომეტრიულ კონფიგურაციაზე.

III. ექსპერიმენტის აღწერა

კომპიუტერული გამოთვლების ვალიდაციისთვის, ჩატარდა მცირე მასშტაბის ექსპერიმენტი. შეიქმნა 650x75x20მმ შიდა გარემოს მქონე სატესტო მაკეტი, 1მმ სისქის აკრილის მინისგან (სურ.3). გარემოში მოთავსდა 400x60მმ ზომის მქონე ელექტრონული დაფის იმიტაციური მოდელი, რომელზეც დამაგრებული იყო სხვადასხვა კონფიგურაციის რეზისტორები, რომლებიც თავის მხრივ, ახდენდნენ კონკრეტული ელექტრული დენის მიწოდების შედეგად, თბოგამოცემის იმიტაციას. სატესტო მაკეტის ჩარჩოს გასწვრივ, დამაგრდა გაზის მიწოდების რამდენიმე ფიტინგი, რომლებითაც მაკეტის შიდა გარემოს, მიეწოდებოდა არგონის (Ar) გაზი, ცვალებადი ნაკადის სიდიდით. ექსპერიმენტის მიხედვით, შემოწმდა თუ როგორ ართმევდა თავს კვლევის ფარგლებში გამოყენებული გამოთვლითი მოდელი, რეალური ფიზიკური პროცესის აღწერას.

ელექტრული დაფის საიმიტაციო მოდელზე დამონტაჟებული რეზისტორები, დაჯგუფდა 9 ერთეულად, რომელთაგან 1 ახდენდა FPGA ელექტრონული ჩიპის თბოგამოცემის იმიტაციას, ხოლო დანარჩენი 8 – ASIC ელექტრონული ჩიპების. FPGA-ს შემთხვევაში, გამოყენებული იქნა რეზისტორების ისეთი კონფიგურაცია, რომელიც 3 W თბოგამოყოფის სიდიდეს შეესაბამებოდა, ხოლო ASIC-ს შემთხვევაში თითო - 0.66 W, ანუ ჯამში მთლიანი ელექტრონული დაფის მოდელზე, წარმოიქმნებოდა $3 + 8 * 0.66 = 8.28W$ სითბო.



სურ. 3 გაგრილების მაკეტის კონსტრუქცია

პროტოტიპს, არგონის გაზი მიეწოდებოდა $\dot{m} = 0.00018 \frac{kg}{s}$ მასური ნაკადის სიდიდითა და $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურით. ცნობილია, რომ არგონის სიმკვრივე და თერმული პარამეტრები შემდეგნაირია: სიმკვრივე $\rho = 1.78 \frac{kg}{m^3}$; კუთრი სითბოდეცადობა $C_p = 525 \frac{J}{kg \cdot K}$; თბოგადაცემა $k = 0.018 \frac{W}{m \cdot K}$. აკრილის მინის იგივენაირი პარამეტრებია: $\rho = 2719 \frac{kg}{m^3}$; $C_p = 1500 \frac{J}{kg \cdot K}$; $k = 0.25 \frac{W}{m \cdot K}$. პროტოტიპის იმ გარემოს მოცულობა, რომელსაც გაზი ავსებს, გამოვიდა $0.000692476\text{ }m^3$. პროტოტიპის შიდა ეფექტური ფართობი $A_{eff} = 0.10\text{ }m^2$. გარემოში მოთავსებული ელექტრონული დაფის საიმიტაციო მოდელი, ახდენდა გაზის გარემოს კვეთის ფართობის შემცირებას და მის გარშემო ქმნიდა ე.წ. ვენტურის ეფექტს, რომლის მეშვეობითაც გაზის სიჩქარე ჩიპების გარშემო უფრო მაღალი იყო, ვიდრე დანარჩენ გარემოში ($v \approx 0.067\text{ }m/s$). პროტოტიპი მოთავსებული იყო სატესტო ოთახში, რომლის ტემპერატურა $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ს შეადგენდა.

აღნიშნული მონაცემებით, სავარაუდო სითბოს ართმევა და ჩიპების საბოლოო მიახლოებითი ტემპერატურა, გამოითვლება შემდეგნაირად:

გაზის მიერ ართმეული სითბო:

$$Q_{Ar} = \dot{m} C_p \times \Delta T_{Ar}$$

$$Q_{Ar} = 0.0936 \Delta T_{Ar} [W]$$

აკრილის მინის ჩარჩოს თბორეზისტენტულობა:

$$R_{cond} = \frac{L}{k} = \frac{0.01}{0.19} \approx 0.053\text{ }m^2K/W$$

გარე კონვექცია:

$$R_{conv} = \frac{1}{h} = \frac{1}{25} = 0.040\text{ }m^2K/W$$

სრული თბორეზისტენტულობა ერთეულ ფართობზე:

$$R_{wall} = 0.093\text{ }m^2K/W$$

სითბოს კარგვა ჩარჩოდან:

$$\dot{Q}_{walls} = \frac{A_{eff}}{R_{wall}} \times (T_{gas} - T_{\infty})$$

$$\dot{Q}_{walls} \approx 1.08 (T_{gas} - 21)[W]$$

გლობალური ენერგიის ბალანსი და გაზის ტემპერატურა:

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{Ar} + \dot{Q}_{walls}$$

$$T_{in} \approx T_{\infty} = 21^{\circ}\text{C}$$

$$8.23 = 0.0936(T_{gas} - 21) + 1.08 (T_{gas} - 21)$$

$$T_{gas} - 21 = \frac{8.28}{1.17} \approx 7^{\circ}\text{C}$$

$$T_{gas} \approx 28^{\circ}\text{C}$$

აქედან გამომდინარე, ძირითადი სითბო გაედინება ჩარჩოს კედლებიდან და მხოლოდ მცირე ნაწილის გაბნევა ხდება არგონის გაზის მიერ.

ვინაიდან, ელექტრული დაფა შედგება სპილენძის რამდენიმე შრისგანაც, გარდა მისი ძირითადი მასალის, თბოგადაცემა გვექნება $k_{PCB} \approx 10 \frac{W}{m \cdot K}$. ელექტრო დაფის სისქე $t_{PCB} = 1.6mm$.

ელექტრონულ დაფაზე ლატერალური თბორეზისტენტულობა

$$R_{spread} \approx \frac{1}{4k_{PCB}t_{PCB}} \approx 16 K/W$$

ჩიპების სავარაუდო ტემპერატურები:

ტემპერატურის ნამატი FPGA-სთვის: $\Delta T_{FPGA} = 3.0 \times (9 - 12) \approx 27 - 36^{\circ}\text{C}$

სავარაუდო საბოლოო ტემპერატურა: $T_{FPGA} \approx 48 - 57^{\circ}\text{C}$

ტემპერატურის ნამატი ASIC-სთვის: $\Delta T_{ASIC} = 5.28 \times (4 - 6) \approx 21 - 32^{\circ}\text{C}$

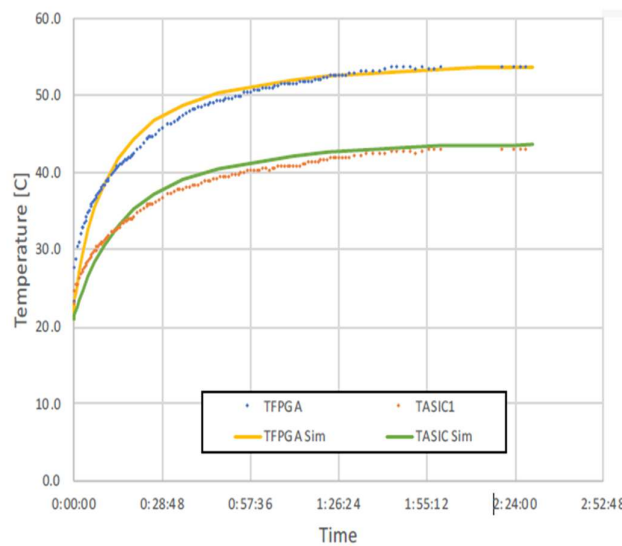
სავარაუდო საბოლოო ტემპერატურა: $T_{ASIC} \approx 42 - 53^{\circ}\text{C}$

IV. შედეგები და განხილვა

მიღებული შედეგების დეტალური აჩვენებს, რომ გამოყენებული თერმული გამოთვლები და სიმულაციის მეთოდოლოგია კორექტულად არის შერჩეული და რეალურად აღწერს დეტექტორის დიზაინის თერმულ ქცევას.

მიღებული მონაცემები ადასტურებს დეტექტორის დიზაინის ოპტიმისაციის არჩეული მიდგომის სისწორეს და მიუთითებს, რომ თერმული მართვის სისტემის ძირითადი პარამეტრების მოდელირებაში სათანადოდ არის გათვალისწინებული.

შედეგები ცხადყოფს, რომ ჩიპის ტემპერატურა მნიშვნელოვნად იზრდება სრული გარემოს სისქის ზრდასთან ერთად, რაც აიხსნება სითბოს გატანის გზების გახანგრძლივებითა და თერმული წინააღმდეგობების მატებით. ამავდროულად, გაზის ნაკადის სიჩქარის ზრდა ეფექტურად ამცირებს ჩიპის ტემპერატურას, რაც მიუთითებს კონვექციურ გაგრილების მნიშვნელოვან როლზე. აღნიშნული შედეგები ხაზგასმით აჩვენებს, რომ გაგრილების სისტემის ეფექტურობა ერთდროულად დამოკიდებულია როგორც გეომეტრიის პარამეტრებზე (გარემოს სისქე, მასალა), ისე ნაკადის დინამიკურ მახასიათებლებზე.



სურ. 4 გაზომილი ტემპერატურები დროზე დამოკიდებულების მიხედვით.
დეტალებისთვის იხ. ტექსტი.

სურ.4 მოცემულია გაზომილი ტემპერატურები დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი. მიღებული შედეგები აჩვენებს მაღალ ხარისხობრივს და რაოდენობრივ შესაბამისობას გაზომილ და სიმულირებულ მონაცემებს შორის, რაც ადასტურებს გამოყენებული თერმული მოდელის სიზუსტესა და სანდოობას. აღნიშნული თანხვედრა მიუთითებს, რომ წარმოდგენილი მოდელი შეიძლება გამოყენებული იქნეს დეტექტორის შემდგომი დიზაინის ოპტიმიზაციასა და სხვადასხვა სამუშაო სცენარების წინასწარი შეფასებისთვის მზაობას.

დასკვნები

1. დადგინდა, რომ არგონის ნაკადი მოცემულ გეომეტრიულ არეში ლამინალური ხასიათისაა და მისი საშუალო სიჩქარე შეადგენს დაახლოებით 0.07მ/წმ-ს;
2. ელექტრონულ დაფაზე სითბოს გავრცელება მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ლოკალური სითბური ნაკადების შემცირებაში და უზრუნველყოფს ზედაპირზე სითბოს უფრო თანაბარ განაწილებას;
3. თბორეზისტენტულობის საფუძველზე შეფასებული სამუშაო ტემპერატურები შეესაბამება საშუალო სიმძლავრის ელექტრონული სისტემების ფუნქციონირების პირობებს;
4. ჩატარებული ანალიზი ადასტურებს, რომ შემუშავებული მეთოდი თანმიმდევრულია და შესაძლებელია გამოყენებული იქნას CFD სიმულაციებსა და ექსპერიმენტული მონაცემების ვალიდაციისთვის.

ლიტერატურა

1. ედიშერ ცხადაძე. (2018). *ელემენტარულ ნაწილაკთა დეტექტორები*.
2. Sauli, F. (2014). *Gaseous radiation detectors: Fundamentals and applications*. Cambridge University Press.
3. Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement* (4th ed.). Wiley.
4. Spieler, H. (2005). *Semiconductor detector systems*. Oxford University Press.
5. Nakamura, K., et al. (2020). Thermal management techniques in high energy physics detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 953.
6. CMS Collaboration. (2014). *Design and performance of the CMS Tracker*. CERN Yellow Reports.
7. LHCb Collaboration. (2019). Operation and cooling strategy of gaseous tracking detectors. *Journal of Instrumentation (JINST)*.
8. Dassault Systèmes. (2022). *CATIA analysis and thermal simulation documentation*.
9. COMSOL Multiphysics®. (2023). *Heat Transfer Module User's Guide*.
10. Conte, V., et al. (2018). Thermal behavior of front-end electronics in gas-filled tracking systems. *IEEE Transactions on Nuclear Science*.

Self-Cooling of a Large Gaseous Detector

- Zviad Tsamaladze** Doctor of Sciences, Georgian Technical University,
77 M. Kostava Str., Tbilisi 0160, Georgia
E-mail: zviadi.tsamalaдзе@cern.ch Tel:+995741775
- Otar Kemularia** Doctor of Sciences, Georgian Technical University,
77 M. Kostava Str., Tbilisi 0160, Georgia
E-mail: oto.kemularia@gmail.com Tel: +995568821788
- Iuri Bagaturia** Associate Professor, Ilia State University,
45 I. Chavchavadze Ave., Tbilisi 0162, Georgia
E-mail: iuri.bagaturia@cern.ch Tel:+995593781142
- Salome Vashakidze** PhD Student (PhD candidate), Georgian Technical University,
77 M. Kostava Str., Tbilisi 0160, Georgia
E-mail: salo_vashakidze@ymail.com Tel:+995593644597

Abstract. Large volume gas detectors are common for particle tracking in high energy physics experiments. We discuss the possibility to use the internal ionization gas also as a coolant fluid to remove the heat produced by an integrated front-end (FE) readout electronics. The technique is based on an optimized fluid dynamics and is applicable to modern low-power electronics. The advantages are a simplified detector design, an overall lower material budget within the tracking detector, as well as reduced costs. We consider the case study of a straw tube tracker and optimize the relevant cooling parameters with thermal analyses. Our results indicate that an efficient cooling can be achieved with maximal operating temperatures below 40°C for the electronic components, using a gas mixture containing up to 30% of CO₂ and relatively modest values of the gas flow.

Keywords: gas detector, thermal management, straw-tube tracker, cooling optimization, high-energy physics