

<https://doi.org/10.15407/sofs2021.01.107>
УДК 330.341.1

О.С. ПОПОВИЧ, доктор економічних наук, головний науковий співробітник,
Інститут досліджень науково-технічного потенціалу та історії науки
ім. Г.М. Доброва НАН України,
бульвар Тараса Шевченка, 60, Київ, 01032, Україна,
e-mail: olexandr.popovych@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5906-8358>

ІЗ ІСТОРІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ З ФІЗИКИ ПЛАЗМИ В УКРАЇНІ

Пам'яті Леоніда Львовича Пасічника — фізика, вчителя, друга...

Стаття присвячена творчому доробку Л.Л. Пасічника, талановитого фізика-експериментатора. Її актуальність визначається необхідністю відновити історичну справедливість стосовно незаслужено забутих оригінальних досліджень та пам'ять про яскраву неординарну особистість, а також передати молодшим поколінням дослідників деякі традиції організації успішної наукової групи.

Післявоєнні десятиліття були особливим періодом у розвитку досліджень з фізики плазми у Києві, поштовх якому дала Друга женецька конференція з мирного використання атомної енергії, проведена у 1958 році під егідою ООН, яка сприяла прориву завіси секретності між дослідниками, що шукали шляхів нагрівання і утримання плазми. Величезна кількість виголошених на ній нових ідей щодо шляхів до оволодіння керованим ядерним синтезом спонукала до створення в Інституті фізики АН УРСР спеціалізованої «Лабораторії № 4», в якій працював (до переведення у новостворений в 1970 році Інститут ядерних досліджень) молодіжний колектив, очолюваний Л.Л. Пасічником.

Л.Л. Пасічник запропонував новий метод прямого вимірювання швидкості переносу заряджених частинок газорозрядної плазми поперек магнітного поля, названий ним фазовим методом, який дозволив знайти відповідь на питання щодо принципової можливості незалежної дифузії електронів та іонів плазми. Здійснивши фазовим методом прямі вимірювання дифузії електронів та іонів плазми в магнітному полі, Пасічник та його учні експериментально підтвердили гіпотезу, що в електропровідних камерах дійсно може порушуватись амбіполярність дифузії плазми, тобто іони переносяться поперек магнітного поля суттєво швидше, ніж електрони. До цього в світовій науковій літературі ряд авторів висловлювали

Цитування: Попович О.С. Із історії досліджень з фізики плазми в Україні. *Наука та наукознавство*. 2021. № 1 (111). С. 107—120. <https://doi.org/10.15407/sofs2021.01.107>

сумніви щодо справедливості згаданої гіпотези. Встановлення цього факту та результати досліджень фазовим методом впливу змінних електричних полів на рух іонів у нейтральному газі мали важливе значення для розуміння фізики процесів переносу заряджених частинок у плазмі та впливу на нього плазмових нестабільностей — ключового питання у вирішенні проблеми утримання плазми магнітним полем.

Крім данини пам'яті видатному фізику, в статті продемонстровано, що українські фізики в описаний період працювали на світовому рівні, розв'язуючи проблеми, які хвилювали міжнародну наукову спільноту. Надано інформацію про особливості організації дослідницької групи Л.Л. Пасічника та формування в ній по-справжньому творчої атмосфери.

Ключові слова: дифузія плазми в магнітному полі, керований термоядерний синтез, фазовий метод, прями вимірювання неамбіполярної дифузії.

Вступ. Історія розвитку вітчизняної науки складається не тільки з резонансних подій і фактів, пов'язаних із діяльністю провідних учених, відзначених почесними званнями та нагородами. Вже із середини ХХ століття отримання нового наукового знання стало повсякденною працею тисяч людей, більшість яких не здобула великої слави, і їх імена сьогодні не відомі широкому загалу. Хоча це були переважно люди талановиті й неординарні — специфіка професії сама по собі зумовлювала такий їх відбір. Вивчаючи розвиток того чи іншого напрямку досліджень, історики нерідко звертають увагу лише на унікальні досягнення і результати, на уславлених лідерів, ігноруючи той факт, що їх яскраві досягнення були б неможливими без доробку тих трудівників науки, яким визначався широкий фронт наукового пошуку. Не приділяється достатньої уваги і еволюції внутрішньої атмосфери в наукових колективах, яка визначається характерами і творчою взаємодією їх членів, хоча від цього значною мірою залежить результативність досліджень. Ігноруючи сьогодні такі «подробиси», ми ризикуємо втратити накопичений досвід і набуті впродовж багатьох десятиліть традиції організації науки, управління науковими колективами, адже фактично можемо судити про них лише з окремих спогадів і мемуарних видань.

Ця робота присвячена, з одного боку, історії розвитку в Україні одного з актуальних напрямів фізики плазми — дослідженню дифузії плазми в магнітному полі протягом 60-х років минулого століття, з іншого — пам'яті фізика-експериментатора Л.Л. Пасічника, який досить плідно, але, на превеликий жаль, недовго працював у цьому напрямі спочатку в Інституті фізики, а потім в Інституті ядерних досліджень Академії наук України. Стаття не позбавлена і певних мемуарних інтонацій через те, що автору випало брати безпосередню участь у названих дослідженнях під керівництвом Л.Л. Пасічника.

Актуальність. Крім відновлення історичної справедливості стосовно незаслужено забутих оригінальних досліджень та пам'яті про яскраву неординарну особистість, актуальність роботи зумовлена потребою передати молодшим поколінням дослідників деякі традиції організації наукової групи, здатної до творчої та плідної праці. Це набуває особливої ваги сьогодні,

коли в українській науці склалася така вікова структура дослідників, яка зумовлює наростаючий розрив між поколіннями, а отже і небезпеку втрати багатьох накопичуваних протягом десятиліть традицій формування посправжньому творчої атмосфери в дослідницьких групах.

Виклад основного матеріалу. 50—60-ті роки минулого століття були особливим періодом в історії ядерної фізики та фізики плазми. Успішне створення атомної бомби, а через десятиліття — і термоядерної, довело, що ядерну енергію цілком можливо вивільнити і використати. Той факт, що ядерний проєкт здійснено лише для створення надпотужної зброї,

виправдовувався спочатку боротьбою з фашизмом, потім протистоянням наддержав. Але для багатьох фізиків участь у ньому стала приводом для появи певного комплексу вини перед людством, адже їм було краще за інших відомо, наскільки небезпечного «джина» вони випустили. Тож не дивно, що в оволодінні керованим термоядерним синтезом, який дасть людству практично невичерпне джерело енергії, вчені бачили й деяке своє моральне виправдання. Цим пояснюється, зокрема, й завзятість, з якою взявся за виконання досліджень з керованого термоядерного синтезу І.В. Курчатов.

Вже на Першій міжнародній конференції з мирного використання атомної енергії, яка відбулася в Женеві у 1955 році, індійський фізик Хомі Джахангір Баба заявив, що тодішній період атомної ери видаватиметься нашим нащадкам «кам'яним віком» атомної ери, коли використовувались тільки реакції поділу важких ядер атомів, а майбутнє — за керованим термоядерним синтезом, і передрік, що людство оволодіє ним через 20 років. Характерно, що тоді багато хто звинувачував Хомі Баба в песимізмі, стверджуючи, що керований «термояд» — завдання не більш складне, аніж бомба, яку створено за істотно менший період.

Але вони помилялись. І навіть сьогодні — через понад 60 років після того «пророцтва» — це завдання ще не можна вважати вирішеним, оскільки фізика плазми (а вже тоді всім було зрозуміло, що синтез ядер легких елементів може відбуватися в ізолюваній від зовнішнього середовища гарячій плазмі) виявилась набагато складнішою наукою, ніж тоді вважалося.

На розвиток фізики плазми в Україні значно більший вплив справила Друга міжнародна конференція з мирного використання атомної енергії, яка відбулася також у Женеві в 1958 році та стала по-своєму унікальним явищем в історії фізики. В ній взяли участь близько п'яти тисяч осіб, у тому числі 2 тисячі офіційних делегатів з 56 країн світу [1]. На конференцію було подано 2200 доповідей, з них 65 заслухано і обговорено, а решта



Л.Л. Пасічник

увійшли в багатотомне видання праць конференції англійською мовою (російською було видано 16 томів вибраних доповідей, напр., [2]). Серед учасників конференції був і тодішній директор Інституту фізики АН УРСР М.В. Пасічник.

Такий небувалий розмах конференції був зумовлений тим, що після довгих вагань і сумнівів керівництво великих держав наважилось піти назустріч вимогам учених відкрити завісу секретності з досліджень, спрямованих на оволодіння керованим термоядерним синтезом. Чи не найбільш активним ініціатором цього був академік І.В. Курчатов — він вважав, що це «проблема велична, проблема людяна, проблема грандіозна» [3], і для її розв'язання повинні об'єднати свої зусилля вчені всього світу. Під час поїздки до Великої Британії в складі урядової делегації на чолі з М.С. Хрущовим він виступив у англійському атомному центрі в Херуелі з доповіддю про дослідження самостискуваного розряду, результати яких за тодішніми мірками вважалися секретними¹.

Врешті-решт рішення було прийнято, і на згадану конференцію були буквально «вивалені» не тільки результати проведених досліджень, а й навіть їх задуми, адже багато хто з учених поспішав «застовбити» свої ідеї, закріпити своє авторство і пріоритет у перспективних напрямках досліджень. Загалом учасники конференції були сповнені оптимізму і роз'їжджалися з бажанням негайно включитися в розв'язання цієї справді грандіозної загальнолюдської проблеми.

Не був винятком у цьому плані і наш Митрофан Васильович Пасічник. Повернувшись із конференції, він вирішив негайно створити в Інституті фізики лабораторію фізики плазми, в чому його гаряче підтримав І.В. Курчатов, а також керівництво Академії. Розташований поруч із територією інституту академічний гараж переобладнали на експериментальний зал, кількох старшокурсників київських вузів направили робити дипломні роботи в провідні наукові центри СРСР і почали проектувати стелларатор — оригінальну плазмову магнітну пастку, про ідею створення якої в Женеві доповідав Л. Спітцер (див. [2], с. 505—521).

Однак цей проект спіткала сумна доля: спочатку за розпорядженням І.В. Курчатова він переключився на будівництво іншої плазмової пастки — «левітрона²», оскільки створення стелларатора за його ж рішенням перенесли в Харків, а після смерті І.В. Курчатова робота взагалі припинилась [5].

Але завдяки цьому в Києві, в Інституті фізики АН УРСР виникла «Лабораторія № 4» — четверта в СРСР лабораторія з фізики плазми, орієнтована на пошук шляхів створення і утримання гарячої термоядерної плазми («Лабораторією № 2» називали інститут Курчатова — з міркувань конспіра-

¹ Більш докладно про ці дослідження і тривалі вагання західних лідерів щодо їх розсекречення див., напр., [4].

² Від англ. *levitation* — вільне ширяння.

ції). Не всі ентузіасти з первісного її складу витримали випробування, пов'язані з її непростотою долею. Однак ті, для кого фізика плазми стала найважливішою частиною життя, лишилися, продовжували працювати, видобуваючи перлини нового знання про надзвичайно складні процеси, які відбуваються в речовині, що перебуває в стані плазми.

Одним із них був однофамілець нашого директора академіка М.В. Пасічника Леонід Львович Пасічник, доктор фізико-математичних наук, людина оригінального мислення, творчий внесок якого у розвиток фізики плазми, у розуміння притаманних цьому стану речовини процесів, а також краса і витонченість задуманих ним і здійснених з його безпосередньою участю експериментів лишаються, на моє глибоке переконання, значною мірою недооціненими.

Народився Леонід Львович у 1932 році у селищі Нижні Серогози Херсонської області в сім'ї ветеринарного лікаря і вчительки. Коли почалася фашистська навала, він встиг закінчити лише два класи середньої школи, пережив із матір'ю німецьку окупацію (тим часом батько воював, був поранений і разом із госпіталем потрапив у полон до ворога).

Але вже в 1949 році хлопець з Херсонщини став студентом фізичного факультету Київського державного університету (КДУ) ім. Т.Г. Шевченка. В 1952 році він перевівся на щойно створений радіофізичний факультет, зорієнтований насамперед на підготовку фізиків-експериментаторів. Там він і долучився до школи члена-кореспондента АН УРСР Н.Д. Моргуліса, в якій були давні традиції досліджень газорозрядної плазми³.

Після закінчення в 1953 році університету Л.Л. Пасічник починає працювати в академічному Інституті фізики, вивчає взаємодію електронного пучка з плазмою газового розряду і вже в 1958 р. захищає за результатами цих досліджень кандидатську дисертацію на об'єднаній науковій раді інститутів фізики і математики⁴.

Отже, в Лабораторію № 4 він прийшов уже кандидатом наук зі своїми ідеями та задумами і з твердою впевненістю, що перш ніж будувати грандіозні експериментальні установки (а тим більше термоядерні реактори!)

³Член-кореспондент НАН України Наум Давидович Моргуліс був справжнім патріархом фізичної електроніки. Перші його роботи опубліковано у 1920-х рр. у журналі під назвою «Телеграфія и телефония без проводов» (скорочено «ТГБП»). Тобто в широкий вжиток тоді ще навіть не увійшли такі терміни, як «радіотехніка», «електроніка» і тим більше «фізична електроніка». Моргуліс був завідувачем кафедри фізичної електроніки в КДУ і одночасно керував відділом в Інституті фізики. Але коли під час чергової кампанії «боротьби із сумісництвом» багатьом провідним ученим запропонували обрати «щось одне», він обрав університет (на відміну, наприклад, від академіка С.Я. Пекаря, який покинув університетську кафедру теоретичної фізики і обрав відділ в Інституті напівпровідників). Моргуліс був визнаним у СРСР авторитетом і у вакуумній, і в плазмовій електроніці, своєрідним, по-своєму навіть унікальним лектором.

⁴Особова справа заввідділом ІЯД Пасічника Л.Л. // Архів НАН України. Ф. 251. Оп. 609. Од. 139.

на основі суто інтуїтивних загальних міркувань, потрібно глибоко вивчити природу фізичних явищ, що відбуваються в плазмі — у цьому вельми специфічному стані речовини, в якому електрони і ядра атомів набувають небувалу і немислиму в інших агрегатних станах кількість ступенів свободи.

Автор цих рядків прийшов у згадану лабораторію в 1962 р. після закінчення того ж самого радіофізичного факультету КДУ. Отримавши призначення і прибувши в інститут, ми з моїм однокурсником Василем Койданом ще місяць не мали можливості зайти в його приміщення — довелося сидіти в бібліотеці, поки нам оформлювали необхідну «форму допуску» до секретних матеріалів, адже ще зберігалась традиція: все, що має хоч якийсь стосунок до ядер атомів, є державною таємницею! І хоча за роки своєї праці в лабораторії я не пам'ятаю жодної таємниці, яка могла б зацікавити якунебудь іноземну розвідку, нам тоді це навіть трохи подобалось, адже таємничість надавала значущості і лабораторії, і нам як її співробітникам.

В лабораторії щойно закінчили збирати модель левітрона, перероблену з привезеного з курчатівського інституту невеликого токамака — тороїдальної магнітної пастки (кажуть, що ця її відома у всьому світі назва виникла в результаті помилки друкарки: в слові «ТОКАМАГ» — скороченого запису, що мав означати «тороїдальна камера з магнітним полем», вона ненароком поставила замість літери «г» — «к»). Переробка ж полягала в тому, що по колу всередині тора було підвішене на тонких вольфрамових дротинках мідне кільце. В справжньому левітроні подібне кільце мало «левітувати» — тобто опори, на яких воно трималось, на кілька мілісекунд повинні були прибиратись, і доки воно не впало, мала бути створена і досліджена плазма. Після чого опори, чи, як ми їх тоді називали, підставки, знову мали підхопити те досить важке мідне кільце. За задумом авторів цієї ідеї «плазмової пастки» струм, що наводився в тому кільці, мав створювати магнітне поле, яке, складаючись із полем котушок, що оточували тороїдальну камеру, мало утворювати таку «магнітну сітку», через яку плазма не зможе проникнути на стінки камери. Ставши членом «левітронної групи», я з моїми ровесниками з гуркотом розряджав потужну батарею високовольтних конденсаторів на нашу установку, конструював і випробовував «підставки» для майбутнього левітрона, деталі та вузли якого були замовлені на кількох харківських заводах, їздив до Москви і Тули добувати для майбутньої установки дефіцитні деталі. Ніякої серйозної фізики з нашої «стрільби» не виходило, але працювали ми самовіддано і мріяли, що фізика почнеться, коли зробимо більшу установку⁵.

Маю всі підстави вважати, що мені пощастило: через деякий час на мене звернув увагу Леонід Львович і запропонував вступити до нього в аспі-

⁵ Поспішаючи, нерідко нехтували правилами техніки безпеки, виконувати які необхідно при роботі з високою напругою (більше 10 кВ). Тож комісія, яка чомусь приїздила з Москви, назвала нас всесоюзним клубом самогубців.

рантуру. А він, на відміну від нас, дійсно займався справжньою фізикою. Мої вагання, чи не буде це «зрадою рідній групі», були зняті тим, що новий директор інституту Антоніна Федорівна Прихотько вирішила ніякого левітрона взагалі не будувати⁶, а замовлені для нього недешеві деталі і вузли передати в Харківський фізико-технічний інститут. Харківчани ж будували свій стелларатор, і їм було не до левітрона. Тож ні в Україні, ні, наскільки мені відомо, в будь-якій іншій країні світу таку установку не було створено.

Ключовою проблемою для тих, хто мріяв про майбутній термоядерний реактор, була дифузія плазми поперек магнітного поля. Вважалося, що саме нею лімітувалися можливості утримання плазми від контакту зі стінками камери майбутнього реактора. А що таке дифузія заряджених частинок, розуміє кожен школяр, — це розповсюдження частинок унаслідок їх хаотичних зіткнень одна з одною та молекулами газу, якщо вони там є. Ми наочно можемо уявити цей процес, аналогічний до поширення диму або пилу в повітрі при відсутності вітру. Але дослідники плазми не мали можливості спостерігати його так само наочно: практично всі дослідження зводились до вимірювання градієнта концентрації заряджених частинок і порівняння його з розрахунком за формулами, які теоретично описують механізм дифузії. Для різних умов, у різних експериментальних установках було здійснено сотні таких досліджень, і практично в жодному з них не вдавалось створити умови, за яких експериментальні дані точно збігалися б з розрахунком. Одним із найбільш популярних у роботах на цю тему став термін «аномальна дифузія», для пояснень якої було висловлено чимало гіпотез.

Для їх перевірки хотілося б знайти спосіб вимірювати не кінцеві наслідки дифузійного процесу, а дослідити безпосередньо сам процес у плазмі — ця думка не давала спокою Л.Л. Пасічнику, і він все ж таки придумав метод її прямого вимірювання. В пригоді став набутий ним досвід роботи з електронними пучками в плазмі. Він не раз переконувався, що електронний пучок взаємодіє з плазмою не тільки впливаючи на неї своїми електричним та магнітним полями, а й здійснюючи додаткову іонізацію залишкового газу, тобто створює додаткові заряджені частинки — збільшує концентрацію плазми.

Задум нового методу (автор назвав його «фазовим методом») полягав у тому, щоб уздовж осі циліндра з магнітним полем, в якому створена газорозрядна плазма, пропустити тонкий і не надто потужний електронний пучок, міняти його інтенсивність (модулювати) з періодом, близьким до часу, який витрачається на те, щоб дифузія винесла заряджені частинки від осі до бокової стінки. Тоді створені цим пучком коливання густини плазми будуть унаслідок дифузії поширюватись від осі до стінки, їх можна зафіксувати з допомогою зонда й, вимірюючи зсув фази цих коливань, безпосередньо фіксувати час (а отже і швидкість) дифузії. Ідея проста і наочна, але реалізу-

⁶ І.В. Курчатова, який, звичайно, не допустив би цього, на той час вже не було.

вати її дуже непросто. Адже плазма «шумить» — в ній безперервно відбувається хаотичний рух заряджених частинок, який збуджує електромагнітне випромінювання, і зонд сприйматиме його одночасно з потрібним нам сигналом про збільшення густини плазми. А сигнал цей повинен бути мінімальним, адже якщо пучок створюватиме надто велику порцію додаткових «пробних» частинок плазми, це вже буде не та плазма, яку ми збирались дослідити.

Виділення потрібного сигналу з шумів — традиційне завдання, яке успішно вирішує радіотехніка за допомогою так званих коливальних контурів. Налаштовуючи радіоприймач (тобто змінюючи власну частоту наявного в ньому коливального контуру), ми маємо можливість не тільки виділити потрібну нам радіостанцію з шумів, а й позбавитись сигналів іншої радіостанції з дуже близькою частотою радіомовлення. Але так звана добротність цих коливальних контурів, тобто можливість налаштуватись саме на потрібну частоту і позбавитись від небажаних, дуже залежить від того, в якому частотному діапазоні ми працюємо. Чим вища частота, тим легше її виділити серед інших.

В нашому ж випадку йшлося про низькі частоти, адже період коливань мав бути навіть довшим, ніж час дифузії заряджених частинок від осі до стінки. З виділенням такого низькочастотного сигналу з шумів без порушення його фазових характеристик були пов'язані найбільші труднощі при здійсненні задуманого експерименту.

Леонід Львович вирішив почати відпрацювання методу з вивчення розпливання маленької плазмової хмарки не в створеній задалегідь плазмі, а в нейтральному газі, поставивши це завдання перед одним зі своїх аспірантів — Валентином Яголою. Деякі наукові керівники, поставивши завдання перед аспірантом, далі лише зрідка цікавляться, як у нього йдуть справи, щось радять і чекають, коли з'явиться якийсь результат. Та у Л.Л. Пасічника був інший стиль наукового керівництва — він активно брав участь у всьому, починаючи від конструювання майбутньої установки, її монтажу, не кажучи вже про участь у вимірюваннях. Щотижня вся його група⁷ детально обговорювала підсумки зробленого і визначала, що має бути виконано наступного тижня.

Про багатомісячні поневіряння Валентина Яголи разом із Леонідом Львовичем, пов'язані з подоланням вищезгаданих і деяких інших труднощів у постановці цього експерименту, більш детально написано в науково-популярній статті [6], опублікованій в 1971 році в журналі «Наука і суспільство». Тут я акцентую увагу лише на тому, що більше року майже на кожному з наших щотижневих семінарів вони розповідали про те, чому, на

⁷ Група придумала собі чудернацьку назву «ПАКОЯГ» з перших літер прізвищ її членів Пасічник, Козак, Ягола. Коли автор цих рядків приєднався до них, довго обговорювалось, з якого боку приліпити до назви ще й його літери, але нічого благозвучного не виходило, тож вирішили залишити її незмінною.

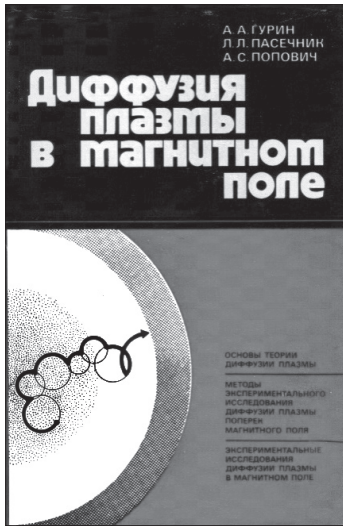
їхню думку, протягом тижня, що минув, експеримент не вдалося здійснити і які вдосконалення установки плануються на наступний тиждень, щоб все ж таки його розпочати. Річ у тім, що для чистоти експерименту необхідно було фіксувати надходження на стінку камери надзвичайно малої кількості пробних частинок (іонів досліджуваного газу). Адже не можна було допустити, щоб просторовий заряд створеної на осі камери «хмаринки» іонів впливав на їх рух. Тоді це вже не можна було б вважати дифузією — процесом, при якому кожен іон фактично рухається сам по собі тільки в результаті хаотичних зіткнень з нейтральними частинками газового середовища. Отже, доводилось працювати майже на межі чутливості приладів і водночас забезпечити надійність і повторюваність отриманих результатів.

Ягола потай зізнавався, що вже зовсім не вірить у те, що такі дослідження можна здійснити, але чекає, доки «Льоня» це першим визнає. Та Леонід Львович не здавався і врешті-решт переїміг: установка запрацювала, пішли результати, які підтверджували справедливість класичної теорії дифузії (а відтак і коректність методики). Однак при вивченні впливу електричного поля на рух іонів було виявлено не передбачені цією теорією явища. Оригінальні й неочікувані результати було отримано також щодо впливу змінних електричних полів: фактично було відкрито раніше невідоме фізичне явище — резонанс на зіткненнях (на певних частотах електричного поля, які чітко корелювали з частотою зіткнень іонів з молекулами нейтрального газу, швидкість переносу іонів до стінки суттєво збільшувалась).

Всі ми були в захваті, дехто пропонував навіть подати заявку на відкриття. Та Леонід Львович не поспішав, і згодом це явище вдалося пояснити з допомогою теоретика Анатолія Гуріна, який, застосувавши загальну теорію дифузійних процесів, довів, що математичний апарат марківських процесів дозволяє чудово змоделювати ефекти дифузійного розповсюдження сигналу, породжуваного в експериментах із застосуванням фазового методу. Тому, узагальнюючи результати цих досліджень у написаному ним розділі монографії [7], Л.Л. Пасічник взяв слова «столкновительный резонанс» в лапки і трактував його лише як експериментальне підтвердження того, що опис дифузійних процесів у замагніченій плазмі вимагає більш коректних розрахунків, ніж це зазвичай робилося.

Ці формули дозволяли пов'язати вимірюваний час руху сигналу з феноменологічним коефіцієнтом дифузії заряджених частинок, створюваних електронним пучком.

Мені ж було доручено застосувати фазовий метод до переносу заряджених частинок поперек магнітного поля у газорозрядній плазмі. І хоча методика начебто була відпрацьована для газу, шлях до отримання гідних довіри результатів також виявився довгим і непростим. У реальній плазмі виділення потрібного сигналу вимагало майже ювелірного налаштування апаратури, і досягти цього ми змогли далеко не одразу. Це, в свою чергу, також вимагало багаторазових перевірок кожного отриманого результату, щоб унемож-



ливити виникнення помилок. Та в 1971 році після довгих і скрупульозних експериментів та не менш довгих обговорювань і суперечок у вельми шанованому журналі «Атомная энергия» нарешті з'явилась наша з Леонідом Львовичем та Валентиною Григорівною Наумовець стаття про *прямі вимірювання незалежної дифузії* іонів та електронів плазми [8]. В останній фразі курсив застосовано, аби підкреслити, що це саме *прямі*⁸ вимірювання, а також те, що дифузія іонів тут відбувається *незалежно* від електронів. Спробую це пояснити.

Річ у тім, що, по-перше, раніше ніхто в світі *прямих* вимірювань дифузії плазми не робив — це дозволив здійснити тільки запропонований Л.Л. Пасічніком фазовий метод;

по-друге, серед дослідників плазми вже кілька років велась дискусія щодо можливості незалежної дифузії заряджених частинок плазми. До цього зазвичай вважалось, що в плазмі може відбуватися тільки амбіполярна дифузія, тобто дифузія іонів і електронів разом. Ні в кого не виникало сумнівів, що якби, наприклад, від якоїсь точки плазми з якоїсь причини відійшли самі тільки іони, то там виник би надлишок електронів, тобто просторовий заряд, який негайно викликав би рух електронів слідом за ними або прискорив повернення іонів. Але коли було опубліковано результати щодо аномальної дифузії плазми в циліндричній металевій камері з повздовжнім магнітним полем, А. Саймон висловив гіпотезу, що це не якась невідома аномальна дифузія, а лише порушення амбіполярності внаслідок того, що електрони стікають уздовж магнітного поля, а тому не стримувані ними іони швидше дифундують поперек нього.

Це викликало чимало сумнівів і заперечень. Нам вдалося прямими вимірювання підтвердити, що у плазмі швидкість дифузійного переносу електронів поперек магнітного поля дійсно може істотно відрізнитися від дифузії іонів, тобто поставити в цій дискусії крапку. Інша річ, що виміряна нами дифузія все одно відрізнялась від класичної.

Важко знайти слова, щоб описати відчуття людини, коли вона усвідомлює, що вперше доторкнулася до певної таємниці природи, — всі ми були безмежно раді тому, що нам це вдалося зробити. Ми продовжували досліджувати дифузію плазми, вплив на неї нестабільностей плазми. Леонід Львович захистив докторську, а я кандидатську дисертацію, разом із ним і А.А. Гури-

⁸ Річ у тім, що всі інші методи, які були відомі на той час, були непрямыми — вони робили висновки про швидкість дифузійного переносу заряджених частинок тільки на основі його кінцевих результатів — градієнту концентрації або тривалості розпаду плазми.

ним ми написали монографію [7], але Леоніда Львовича не полишали думки про те, як вдосконалити фазовий метод. Йому було прикро, що ніхто не наважився ним скористатися, крім нас (оскільки це була дуже непроста задача). Цілком можливо, що саме тому дехто не вірив у достовірність отриманих нами результатів.

Коли Л.Л. Пасічник почав заглиблюватись у публікації з апаратурного кореляційного аналізу, він зацікавив ними й мене. Адже цей підхід у перспективі міг дозволити обходитися без модульованого електронного пучка на осі нашої циліндричної камери і тих пробних частинок плазми, рух яких ми вивчали, і досліджувати дифузію, лише аналізуючи розповсюдження випадкових коливань густини частинок і полів у плазмі. Якби доля не відірвала мене тоді від фізики плазми, то найвірогідніше саме цим ми з ним і зайнялись би.

Хочеться особливо підкреслити на рідкість доброзичливу і творчу атмосферу, яка панувала в групі «ПАКОЯГ». Безумовним її лідером був, звичайно, Леонід Львович, але він ніколи не вимагав незаперечної згоди з його думками. А якщо хтось із його підопічних у дискусії, не погоджуючись з ним, все ж таки доводив свою правоту, він щиро хвалив його і всім своїм виглядом демонстрував радість і навіть гордість із того, що в нього такі розумні учні.

Ось як характеризує атмосферу в очолюваному ним науковому колективі Валентина Григорівна Наумовець, яка працювала з Леонідом Львовичем ще до створення Лабораторії № 4, а потім після тривалої перерви знову повернулася в цей колектив: *«Він був фізично сильним чоловіком кремезної статури, і перед ним усі його колеги виглядали майже як «дрібнота». Мабуть цей факт, а також його від природи м'який характер зумовлювали те, що він ставився до свого оточення з деякою поблажливістю. Разом із тим він виявляв рішучість і вимогливість (але без грубості), коли цього потребували справа і притаманне йому прагнення до справедливості. Все це створювало сприятливу творчу атмосферу в нашому колективі, в якому були люди з різними характеристиками, амбіціями і життєвим досвідом. Більшість колег не дуже сильно відрізнялася від Леоніда Львовича за віком (були молодшими від нього на 3—5 чи трохи більше років) і називали його Льонею. Однак усі ми визнавали його високий авторитет.*

*Чудовою людиною за всіма його рисами був Леонід Львович. Я завжди згадую його з великою теплотою і вдячністю за мої незабутні творчі роки, прожиті у спілкуванні з ним».*⁹

У 1970 році при створенні Інституту ядерних досліджень практично всі співробітники Лабораторії № 4 (крім нещодавно призначеного керівника М.Д. Габовича) проголосували за перехід до нього, але керівництво Інституту

⁹ Ці слова В.Г. Наумовець на моє прохання написала після прочитання одного з варіантів рукопису статті.

фізики вирішило відпустити туди лише половину її складу. Леонід Львович очолив цю групу і став завідувачем відділу фізики плазми Інституту ядерних досліджень.

І хоча після зміни у 1974 році директора цього інституту зацікавленість його керівництва в експериментальних дослідженнях плазми істотно зменшилась, але вони тривали. Під безпосереднім керівництвом Л.Л. Пасічника досліджувалися явища переносу плазми і можливості її нагрівання в умовах розвинутих нестабільностей, розроблялися нові способи створення пучків важких іонів та інші напрями технічного використання плазми. У співпраці з науковцями Інституту кібернетики розпочався експеримент щодо стабілізації нестійкостей плазми керованими магнітними полями, на завершення якого, на жаль, так і не вдалося знайти необхідні ресурси.

У 1984 році Леоніда Львовича не стало — він трагічно загинув 23 грудня, їдучи поїздом у службове відрядження на Всесоюзну наукову конференцію в м. Миколаїв. Життя 52-річного вченого обірвалось у розквіті творчих сил. Написана за його задумом і з безпосередньою участю монографія [7] розійшлася світом¹⁰, а численні публікації розсіпані у безмежному морі робіт із фізики плазми. Очолюваний ним відділ фізики плазми досі існує в Інституті ядерних досліджень НАН України, хоча можливості для експериментів з плазмою там зараз вкрай обмежені.

Висновки. На конкретному прикладі людської долі й досліджень, про які йшлося вище, можна бачити, що науковці України, які працювали в галузі фізики газорозрядної плазми, активно відгукалися на світові тенденції розвитку науки і питання, що хвилювали міжнародну наукову спільноту, шукали і знаходили на них переконливі відповіді. Не всі з них (навіть із тих, хто отримував унікальні результати!) здобули світову славу, почесні звання і нагороди, але всі отримували величезне задоволення від самого процесу наукового пошуку і були щасливі у своїй роботі. Крім яскравих результатів і блискучих експериментів вони вміли створювати в своїх колективах атмосферу творчого дерзання і взаємодопомоги у пристрасному прагненні відобути у природи частку нового знання. Сподіваємось, що імена цих учених, принаймні найбільш достойних із них, знатимуть і пам'ятатимуть нові покоління науковців.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. На второй Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. *Атомная энергия*. 1958. Т. 5. Вып. 5. С. 583—589.
2. Физика горячей плазмы и термоядерные реакции. Т. 1. Избранные доклады иностранных ученых. М.: Атомиздат, 1959. 715 с.
3. Курчатов И.В. Речь на XX съезде КПСС // «Правда», 1959, 5 февраля.

¹⁰ Наприклад, один із моїх колишніх колег Я.І. Колісниченко розповідав, що побачив її в бібліотеці Токійського університету.

4. Попович О.С. Керована термоядерна. *Наука і суспільство*. 1970, № 1. С. 18.
5. Попович О.С. До історії розвитку досліджень з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу в СРСР та Україні. *Наука та наукознавство (Матеріали II Добровської конференції з наукознавства та історії науки)*. 2002. № 4 (Додаток). С. 194–202.
6. Попович О.С. Одна із стежин. *Наука і суспільство*. 1976. № 6. С. 17–19.
7. Гурин А.А., Пасечник Л.Л., Попович А.С. Диффузія плазми в магнітному полі. К: «Наукова думка», 1979. 268 с.
8. Пасечник Л.Л., Попович А.С., Наумовец В.Г. Прямые измерения независимой диффузии ионов и электронов плазмы поперек магнитного поля в ограниченном проводящем цилиндре. *Атомная энергия*. 1971. Т. 31. № 3. С. 275.

Одержано 22.11.2020

REFERENCES

1. (1958) At the Second International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy. *Atomic Energy*, vol. 5, issue 5, 583–589 [in Russian].
2. (1959) Physics of hot plasma and thermonuclear reactions. Vol. 1. Selected reports of foreign scientists. Moscow: Atomizdat, 715 [in Russian].
3. Kurchatov, I.V. Speech at the 20th Congress of the Communist Part of the Soviet Union. “Pravda”, 1959, February 5 [in Russian].
4. Popovych, O.S. (1970). The controlled thermonuclear reaction. *Science and society*, 1, p. 18 [in Ukrainian].
5. Popovych, O.S. (2002). Historical evidence of research in plasma physics and controlled thermonuclear synthesis in the USSR and Ukraine. *Science and Science of Science (Proceedings of the Second Dobrov Conference on Science of Science and History of Science)*, 4 (Supplement), 194–202 [in Ukrainian].
6. Popovych, O.S. (1976). Odnа iz stezhyn. *Science and society*, 6, 17–19 [in Ukrainian].
7. Gurin, A.A., Pasechnik, L.L., Popovich, A.S. (1979). The diffusion of plasma in the magnetic field. Kiev: “Naukova dumka”, 268 [in Russian].
8. Pasechnik, L.L., Popovych, A.S., Naumovets, V.G. (1971). Direct measurements of independent diffusion of ions and electrons of plasma across the magnetic field in a confined conductive cylinder. *Atomic Energy*, vol. 31, issue 3, p. 275 [in Russian].

Received 22.11.2020

O.S. Popovych, Dsc (Economics), chief researcher,
Dobrov Institute for Scientific and Technological Potential
and Science History Studies of the NAS of Ukraine,
60, Taras Shevchenko boulevard, Kyiv, 01032, Ukraine,
e-mail: olexandr.popovych@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5906-8358>

HISTORICAL EVIDENCE OF RESEARCH IN PLASMA PHYSICS IN UKRAINE

The article is devoted to the research achievements of L.L. Pasichnyk, a talented experimental physicist. Its topicality stems from the need to restore the historical justice with respect to unjustly ignored novel research, and to inform younger generations of researchers some traditions in organization of a successful research team.

The postwar decades were a unique period in the development of plasma physics in Kyiv, to which an impulse was given by the Second Geneva Conference on Peaceful Use of Atomic Energy held in 1958, which helped in breaking the curtain of secrecy between researchers seeking for ways to heat and maintain plasma. A great many new ideas on ways to master the controlled

nuclear synthesis, articulated in it, led to the creation of specialized “Laboratory No 4” in the Physics Institute of the Academy of Sciences of the UkrSSR, where a young team headed by L.L. Pasichnyk worked (before they were transferred to the Institute for Nuclear Research newly created in 1970).

L.L. Pasichnyk proposed a new method for direct measurement of the velocity with which charged particles of gas discharge plasma are transferred across the magnetic field, branded by him as the phase method, which enabled to address the issue on whether independent diffusion of electrons and ions could ever be possible. Through applying the phase method to direct measurements of the diffusion of electrons and ions of plasma in the magnetic field, Pasichnyk and his disciples could experimentally confirm the hypothesis that ambipolarity of plasma diffusion can actually be disturbed in electrically conductive cameras, with ions transferred across the magnetic field essentially quicker than electrons. The validity of the above hypothesis had been questioned by a number of authors publishing in the international scientific editions. Establishing this fact along with successful explorations of the impact of alternating electric fields on the movement of electrons in a neutral gas had great importance for understanding the physics of processes involved in the transfer of charged particles in plasma and the effects of plasma instability for it, i. e. the core issue in the solution of the problem of plasma maintenance by the magnetic field.

Apart from the tribute to the outstanding physicist, the article demonstrates that the Ukrainian physicists’ performance matched international standards, allowing them to address the problems that were in focus of the international scientific community. Also, information about organizational specifics of the L.L. Pasichnyk’s research team and ways to foster genuinely creative atmosphere in it is given.

Keywords: *diffusion of plasma in magnetic field, controlled thermonuclear synthesis, phase method, direct measurements of non-ambipolar diffusion.*