

Р.Ш. НИГМАТУЛЛИН: ТРАЕКТОРИЯ НАУЧНОГО ТВОРЧЕСТВА

Ю.К. Евдокимов

Незаурядные творческие способности Р.Ш. Нигматуллина проявились достаточно рано – еще в школьные годы, а на студенческой скамье он уже приобщился к серьезным научным исследованиям. Однако начало его творческого пути было прервано на несколько лет и подверглось самому серьезному испытанию – это была армейская служба в грозныевоенные годы.

После войны в 1945 году Р. Нигматуллин поступает на физико-математический факультет КГУ, который окончил с отличием (1950 год) по специальности «Физика». Будучи студентом, он плодотворно сочетал отличную учебу (3-й курс – стипендия им. Чеботарева, 4-й курс – стипендия им. Молотова, 5-й курс – стипендия им. Сталина) с научно-исследовательской работой в студенческом научном обществе (СНО) и участием в общественной работе (ответственный редактор факультетской газеты, председатель физико-математического отделения СНО КГУ). Учебу в КГУ он завершил без единой четверки, защитив на отличную оценку и дипломную работу «Мостовой метод измерения парамагнитного поглощения».

В год окончания вуза Рашиду Нигматуллину исполнилось 27 лет. Он уже получил классическое университетское образование, основательную подготовку по естественнонаучным дисциплинам в традициях известной казанской физической школы КГУ, а также успел пройти суровую школу войны.

Выбор пути. После окончания университета Рашид Нигматуллин решением ученого совета КГУ был рекомендован в аспирантуру, которую окончил в октябре 1953 года с успешной защитой диссертации на степень кандидата физико-математических наук по теме: «Осциллографический метод в применении к полярографии на твердых электродах». После окончания аспирантуры он назначается на должность ассистента кафедры молекулярной физики и по совместительству заместителем декана физико-математического факультета КГУ. При этом он начинает читать спецкурс «Физическая теория растворов» для студентов 4-го курса [1].

Рашид Шакирович часто вспоминал о первоначальном своем желании после окончания университета заниматься парамагнитным резонансом в лаборатории члена-корреспондента АН СССР С.А. Альтшулера, продолжившего исследования в этой области после отъезда Е.К. Завойского из Казани. Тем более, что

был задел – его дипломная работа, и были заманчивые предложения со стороны Семена Александровича.

Научные интересы к парамагнитному резонансу сохранялись у Р.Ш. Нигматуллина достаточно долго – вплоть до 1960 года, когда им были опубликованы две работы (одна из них – в соавторстве с Р.М. Валишевым) по методу и установке для измерения релаксационных процессов спин-решеточных переходов с длительностью $\geq 10^{-10}$ с, характеризующих кинетику процессов намагничивания парамагнетиков. При этом использовался импульсный метод, когда образец облучался коротким радиочастотным импульсом, что исключало нагревание образца, имеющего место в непрерывном методе, и существенно повышало точность измерений. Его установка позволяла уменьшить на порядок по сравнению с существующими методами длительность регистрируемых релаксационных явлений в парамагнетиках. Казалось, достигнутый научный результат весьма весом и можно смело продвигаться дальше в этом же направлении. Наверное, можно было бы, если бы этим человеком не был Рашид Шакирович.

Как видим, основной выбор им был сделан не в пользу научного направления широко известной и авторитетной научной школы, открывшей миру явление парамагнитного резонанса. И это далеко не единственный случай, когда тот или иной выбор Р.Ш. Нигматуллин делал неожиданно, казалось бы, вопреки естественному ходу событий. Как мне представляется, критерием выбора для него были прежде всего степень личной творческой независимости и свободы для решения проблемы, связанной с этим выбором.

Для понимания проблемы выбора необходимо немного вернуться назад – в предвоенные и послевоенные годы.

Прошедший XX век ввел в повседневную жизнь электричество, радио и компьютеры. Как правило, проводниками новых идей, технологий и техники во все времена были талантливые молодые люди. В 30–40-е, а также в послевоенные годы массовым увлечением молодежи стала радиотехника. К тому же, это время действительно было «ренессансом» советской науки и техники. Масштаб увлечений радиотехникой был приблизительно таким же, как в наши дни увлечение молодежи компьютерными технологиями и интернетом.

Не миновали эти увлечения в предвоенные годы и юного Рашида: это чтение журнала «Радиостроитель», научно-популярной литературы по радиотехнике, а также изготовление самостоятельных любительских конструкций. Одна из них – усилительная приставка к патефону – демонстрировалась в 30-х годах на выставке молодежного творчества г. Казани и получила диплом. Конечно, увлечение радиотехникой и полученный практический багаж неизбежно должны были когда-то проявиться. Как мы теперь уже знаем, именно они в дальнейшем определяли направление творческой и профессиональной деятельности Р.Ш. Нигматуллина.

Радиотехнические истоки можно найти в его подходе к решению задачи полярографии. Так, измерение и запись полярограмм (вольт-амперных характеристик) электрохимической ячейки в начале 50-х годов, да и в более поздние годы, проводилась, как правило, с помощью самопишущих приборов с малой оперативностью представления результатов измерения и с электромеханической разверткой потенциала. В своей кандидатской диссертации Р.Ш. Нигматуллин применил современные по тем временам методы, связав ячейку с электронным осциллографом и быстрой циклической электронной разверткой электродного потенциала. Это позволило исследовать в ячейке быстрые процессы, что было невозможно на классических полярографах. Поскольку при этом нарушался квазистатический режим измерения из-за быстрого изменения потенциала, необходимо было распространить теорию измерения на динамические режимы ячейки, а это, в свою очередь, потребовало привлечения нестационарных и нелинейных моделей электрохимической ячейки при различных уровнях входных воздействий.

Эта работа положила начало осциллополюрографическому направлению научных работ на кафедре теоретической радиотехники и электроники (ТРЭ) КАИ. Впоследствии сотрудниками кафедры были защищены в этой области кандидатские (В.И. Мирошников, М.Р. Вяселев, В.П. Железцов, Е.Ф. Базлов, В.А. Михайлов) и две докторские (М.Р. Вяселев, В.П. Железцов) диссертации.

Переломным моментом в жизни Р.Ш. Нигматуллина стал июнь 1954 года, когда он был приглашен в КАИ на должность заведующего кафедрой теоретических основ радиотехники (впоследствии ТРЭ). Приход в КАИ в роли не просто рядового преподавателя, а в должности руководителя кафедры, ставил перед Р.Ш. Нигматуллиным сложную проблему. Необходимо было, во-первых, выбрать направление собственных дальнейших научных исследований, во-вторых, выбрать научное направление кафедры, которая была организована всего два года назад, и систематические научные исследования еще не велись. Необходимо было совместить свои научные интересы, которые, вообще говоря, не совсем вписывались в русло традиционной радиотехники, с профилем кафедры и интересами ее коллектива. Научным направлением, позволившим учесть все эти условия, стала молекулярная электроника.

Для понимания с сегодняшних позиций такого выбора важно ретроспективно взглянуть на концептуальную основу зарождения этого основного научного направления кафедры (в период зарождения эту область науки и техники называли электроникой жидких тел, хемотроникой и лишь позже молекулярной электроникой).

Развитие электроники и микроэлектроники было стимулировано необходимостью создания миниатюрных приборов и устройств. Как известно, существует всего четыре (!) основных вида межфазных границ (гетероструктур) и созданных на их основе приборов:

- электрод/вакуум – вакуумные приборы (электронные лампы, электронно-лучевые трубки и т.д.);

- электрод/газ – газоразрядные и плазменные приборы;
- электрод/жидкое тело – молекулярные (жидкостные) приборы;
- электрод/твердое тело – полупроводниковые (твердотельные) приборы.

Причем в силу подвижности жидкости и большого разнообразия различных физических и физико-химических явлений и эффектов граница электрод/жидкость значительно богаче остальных структур.

В начале 50-х годов, когда в качестве элементной базы электроники доминировали вакуумные приборы – лампы, а полупроводниковые приборы только-только появились, концептуальная идея Р.Ш. Нигматуллина о создании разнообразных миниатюрных электронных приборов и датчиков на основе использования свойств границы электрод/жидкость была, безусловно, новаторской и, как показывает время, плодотворной. Особенно широка сфера приложений систем электрод/жидкость в области создания различного рода датчиков – от датчиков неэлектрических величин до биосенсоров. Формулируя и обосновывая это новое научное направление, он отмечает: «...Теоретическое изучение электролитической ячейки – этого классического объекта физики и химии – проводилось обычно с точки зрения преобразования химической энергии в электрическую (например, в гальванических и топливных элементах) или же химического превращения вещества на электродах (при электросинтезе, в гальванотехнике и т.д.). Использование ячейки в качестве элемента цепи для преобразования электрических сигналов приводит к постановке новых теоретических задач...» [25].

В неофициальной обстановке в шуточной форме Рашид Шакирович любил напоминать о том, что граница фазового раздела электрод/электролит очень «интимная область», а потому интересна для исследований.

В наши дни, когда полагают, что XXI век будет веком сенсоров и датчиков и совершаемая ими информационная революция будет сопоставима с технической революцией, осуществленной появлением микропроцессоров в конце XX века, становится ясной плодотворность выбора научного направления. Проблема выбора – всегда трудная задача и вдвойне трудная, когда она касается большого коллектива. Сегодня, конечно, легко рассуждать, но тогда, на фоне победного шествия электронной лампы, а также заманчивых и, безусловно, гигантских перспектив развития полупроводниковых приборов нужно было принять весьма непростое решение о выборе научного направления кафедры в пользу молекулярной электроники. Нужны были одновременно убежденность, твердость и уверенность в выборе. Рашид Шакирович обладал этими качествами.

Вскоре после прихода Нигматуллина в КАИ в «Ученых записках» КГУ были опубликованы первые полученные на кафедре научные результаты (шесть статей) по тематике, связанной с полярографическим датчиком и созданием осциллополюрографической аппаратуры [2, 4 – 8].

Вехи творческого пути. Рашид Шакирович был сторонником строгого академического стиля в научных исследованиях и требовал этого, по возможности, от своих учеников. Все статьи, написанные им единолично, отличаются четкостью постановки задачи и цели, преследуемой этой работой, а также ясным изложением метода решения и достигнутых результатов. Классическое университетское образование и отличное владение математическим аппаратом позволяли ему легко формализовать свои идеи в математические модели. Одновременно с этим его статьи содержат в себе элементы едва заметной увлекательной научной интриги и необыкновенную легкость и краткость изложения сложных вопросов. В явной форме эти элементы обычно проявлялись в его эмоциональных устных выступлениях и докладах и, естественно, каким-то неуловимым образом проникали в статьи. Кроме того, при выступлениях Рашида Шакировича всегда возникало ощущение чрезвычайной важности и значимости предмета его сообщения, что придавало докладу дополнительную эмоциональную окраску.

Рашид Шакирович был ученым энциклопедического плана с чрезвычайно широким научным кругозором, оригинальным и самобытным стилем мышления, что отразилось в большинстве результатов, полученных им на стыке многих наук.

Большое внимание Рашид Шакирович уделял строгой математической формулировке задачи, при этом тщательно оговаривал все допущения и ограничения при математической постановке. Этого же он требовал от своих коллег, неустанно напоминая об этом на различных научных семинарах и конференциях. К сожалению, несмотря на множество высказанных им идей, работ, написанных им единолично, не так много – их можно буквально пересчитать по пальцам. Причиной этого была катастрофическая нехватка времени и постоянный цейтнот в силу чрезвычайно большой загруженности на посту ректора. Кроме того, и это надо подчеркнуть ради истины, Рашид Шакирович любил получать новые результаты и щедро делиться ими, а писать и публиковать статьи особо не был склонен. Это отношение к публикациям в определенной степени передалось и его ученикам, поэтому весьма хорошие результаты, полученные нашими коллегами, нередко оставались неопубликованными. Однако положительным явилось то, что на кафедре не было научных графоманов, спешащих опубликовать малейший результат.

Опубликованные Р.Ш. Нигматуллиным работы насыщены идеями, содержательны в научном плане и от них исходят импульсы для генерации новых идей.

Основополагающими работами Р.Ш. Нигматуллина, в которых в концентрированной форме излагаются ключевые вопросы теории электролитической ячейки, являются статьи «Теория электрохимического диода» и «Общее уравнение и электрический аналог электролитической ячейки со сферическим стационарным микроэлектродом», опубликованные в 1963 году

в «Докладах Академии наук СССР» по представлению главы советской электрохимии, директора ИЭЛАН академика А.Н. Фрумкина [25, 26]. В них была впервые изложена разработанная Р.Ш. Нигматуллиным теория двухэлектродной электролитической ячейки и, как отмечает автор, «нового элемента для создания высокоэффективных преобразователей информации» [25]. В этой работе найдены переходная характеристика для тока через микроэлектрод, статическая вольт-амперная характеристика, а также предложена электрическая модель ячейки для малых сигналов. В [26] получены электрические аналоги электрохимической ячейки в виде операторных сопротивлений, реализуемых системой с распределенными резистивно-емкостными параметрами (RC-кабель).

Блестящим изложением теории электроники жидкого тела, безусловно, является его докторская диссертация [40]. Поскольку изложение в ней не сковано жесткими рамками объема, то появилась возможность дать развернутое и выпуклое представление вопросов теории и практики электрохимических преобразователей информации.

В [25, 26] были впервые количественно определены значения элементов эквивалентной схемы электрохимической ячейки, а также предложены электрические аналоги диффузионного сопротивления для обратимых окислительно-восстановительных систем со сферической полубесконечной диффузией. В качестве электрического аналога диффузии был предложен полубесконечный резистивно-емкостный RC-кабель, процесс распространения потенциала в котором аналогичен процессам диффузии.

Р.Ш. Нигматуллин показал, что входной импеданс системы электрод/электролит пропорционален $p^{-1/2}$, где p – оператор Лапласа. На основании этого им впервые предложено это свойство ячейки использовать для реализации математических операций дробного интегрирования и дифференцирования половинного порядка.

На этих первоначальных результатах следует остановиться несколько подробнее, поскольку тема дифференцирования дробного порядка в течение последних сорока лет получает неожиданное и все новое развитие, тем более, что эта область исследования целиком занимала Р.Ш. Нигматуллина в последние годы его жизни.

Исторически дробные производные произвольного порядка восходят к работам русского математика Летникова. Первоначально операцию дробного дифференцирования Р.Ш. Нигматуллин предложил использовать для обработки полярографического сигнала [22, 40], что позволило существенно повысить разрешающую способность измерений по потенциалу и амплитуде. Другое предложение для применения дробного дифференцирования следовало из анализа полученного Р.Ш. Нигматуллиным интегрального уравнения связи между поверхностной концентрацией и плотностью потока вещества через электрод. Он показал, что, дифференцируя дробным оператором $d^{1/2}/dt^{1/2}$ изменение во времени поверхностной концентрации $C(0,t)$,

можно непосредственно найти градиент концентрации на электроде или плотность тока через электрод, не прибегая к решению полной краевой задачи для диффузионного уравнения. Это замечательное свойство далее было им предложено использовать для электрического моделирования ячейки.

Другая весьма оригинальная и плодотворная идея Р.Ш. Нигматуллина состояла в том, что для аппаратной реализации операции дробного дифференцирования предлагалось использовать саму электрохимическую ячейку или же ее электрический аналог – упомянутый RC-кабель. Включив ячейку или ее эквивалент во входную цепь или в цепь обратной связи операционного усилителя, можно получить соответственно устройство для дробного дифференцирования или интегрирования. Эта идея стала основой для реализации ряда моделей полярографов и теоретической базой нескольких кандидатских диссертаций.

Несмотря на колоссальные мощности современной вычислительной техники, эта плодотворная идея до сих пор свежа и не стареет, поскольку скорость вычислений, производимых в реальном масштабе времени импедансным оператором электрохимической ячейки или RC-кабеля, на много порядков превосходит возможности компьютеров.

В середине 80-х годов направление дробных операторов неожиданно получило новое дыхание, связанное с элементами постоянной фазы, так называемыми импедансными CPE-элементами (constant phase elements), а также с объектами фрактальной геометрии. Под «фракталом» понимают самоподобные геометрические объекты, характеризующиеся регулярной или хаотической неоднородностью, количественно описываемые дробной размерностью. В отличие от евклидовой геометрии, которая имеет дело только с целочисленными размерностями $\dim = 0, 1, 2, 3$ (точка, линия, плоскость, объем), фрактальная геометрия оперирует дробными размерностями $0 < \dim < 3$. Идеи такой геометрии тесно связаны с именами крупных математиков – Вейерштрасса, Кантора, Пеано, Хаусдорфа, Безиковича, Коха, Серпинского, а в последние десятилетия – с именем Бенуа Мандельброта.

Рашид Шакирович полагал, что поскольку любой произвольный математический оператор при физической реализации имеет вполне определенную геометрию или, иначе, топологию, то должна существовать связь между операторами дробного порядка и объектами с фрактальной геометрией. Действительно, например, оператор диффузионного импеданса можно представить в виде каскадно включенных RC-элементов. При малом диапазоне частот для получения эквивалента диффузионного импеданса достаточно одного или двух RC-каскадов. С возрастанием частотного диапазона для сохранения эквивалентности необходимо увеличивать количество каскадов путем геометрического деления исходного RC-элемента на более мелкие RC-элементы, самоподобные в топологическом смысле. В реальной электрохимической ячейке или иной системе с распределенными параметрами имеет место «автоматическое» самоподобие, т.е. согласованное изменение

масштабов процесса по времени и по геометрии. Такая самосогласованность приводит к постоянству фазового сдвига между воздействием и откликом в широкой области частот или, иначе, к СРЕ-элементам. Следует отметить, что впоследствии связь между объектами фрактальной геометрии и дробными операторами была математически строго доказана Равилем Рашидовичем Нигматуллиным – старшим сыном Рашида Шакировича, ныне профессором КГУ.

В последние годы жизни фрактальные идеи настолько захватили Рашида Шакировича, что прежний интерес к дробным операторам возобновился с новой силой. В частных беседах, на семинарах он с большим увлечением и красочно рассказывал о философии фракталов, целого и дробного, о возможных приложениях в теории электрических цепей. Эти беседы происходили и на прогулках, когда он иногда просил меня проводить его от 5-го здания до его дома

на Большой Красной. В его кабинете для наглядной иллюстрации геометрии фракталов появился макет дерева Коха, изготовленный в кафедральной мастерской. Он до сих пор хранится у меня в кабинете, своим необычным видом неизменно возбуждая интерес посетителей.

Здесь, может быть, уместно привести еще один эпизод, связанный с фракталами. В 1988 году автор этих строк был слушателем факультета повышения квалификации (ФПК) в МАИ. Неожиданно Рашид Шакирович прислал мне письмо с внушительным списком публикаций по фракталам и с просьбой найти эти работы и сделать ксерокопии. Поиски я провел в Ленинской библиотеке

и ГПНТБ. В процессе этой работы и под влиянием ранних бесед с Рашидом Шакировичем я тоже увлекся проблемой фракталов и, прежде всего, в приложении к задачам измерения полей турбулентности и количественной оценки информативности совокупности большого количества дискретных датчиков.

Мои соображения состояли в том, что топологическую совокупность чувствительных элементов датчиков можно количественно описать фрактальной размерностью. Кроме того, ее размерность должна быть согласована с размерностью измеряемого поля. И, наконец, стратегия и тактика опроса датчиков должны быть такими, чтобы прирост фрактальной размерности был максимален за каждый такт опроса.

Вернувшись из Москвы, я решил обсудить эти соображения с Рашидом Шакировичем. В это ясное и свежее летнее утро Рашид Шакирович был в прекрасном настроении и состоянии духа, еще без накопленного груза дневных забот. Он, «с ходу» уловив суть моего изложения, пересказал эти идеи уже по-своему и гораздо интереснее, чем я, дополняя и расцвечивая их своими мыслями. В заключение беседы он одобрил и посоветовал дальше развивать взятое направление (впоследствии это было сделано и отражено в моей докторской диссертации).

Важные составные части большинства исследований научной школы Р.Ш. Нигматуллина были связаны с электрическим моделированием фазового раздела электрод/электролит и разработкой этих моделей. Электрическая модель позволяла, например, наглядно представлять инженеру-электронщику на понятном ему «электрическом» языке процессы, протекающие в электрохимической системе, а затем эффективно сопрягать электрохимическую ячейку с электронными устройствами.

Впоследствии сложилось отдельное научное направление по разработке электрических моделей систем электрод/электролит, вольтамперметрического датчика и методов его моделирования для задач электроанализа, преобразования и обработки измерительных сигналов.

Прежде всего в этом плане следует отметить работы профессора М.Р. Вяслева и возглавляемого им научного направления вольтамперметрического анализа. Совсем недавно, в начале 2003 года, в центральном издательстве «Мир» вышла фундаментальная монография Г.К. Будникова, В.Н. Майстренко, М.Р. Вяслева «Основы современного электрохимического анализа», в которой нашли отражение и полученные на кафедре научные результаты по теории и аппаратурным методам вольтамперметрии (полярграфии).

В настоящее время осциллополярграфическая школа КГТУ-КАИ является известной и ведущей научной школой в стране. Разработанные на кафедре ТРЭ осциллополярграфы (свыше 13 различных моделей, начиная от аналоговых, заканчивая микропроцессорными моделями) демонстрировались на ВДНХ и за рубежом, получая многочисленные медали и дипломы. Группа исследователей кафедры за цикл работ по вольтамперметрии трижды (1976, 1983, 1992) завоевывала диплом первой степени на конкурсе научных работ КАИ.

В настоящее время под руководством профессора М.Р. Вяслева по данному направлению работают научные сотрудники Э.И. Султанов, Л.М. Урманчеев, Ю.В. Добровольский, М.И. Нурғалиев, А.А. Сухарев, А.Г. Мифтахов, Ю.В. Новошинов, А.М. Лихачев, Д.В. Глебов и др.

Направление электрического моделирования получило также развитие в работах Е.Ф. Базлова, Э.И. Султанова, Л.М. Урманчеева, И.К. Насырова, Ю.К. Евдокимова, Ф.А. Карамова и др.

Новый и последний прорыв, который предпринял Рашид Шакирович, развивая направление дробных операторов, был переход от задач анализа к задачам синтеза электрических цепей с произвольной дробной степенью ν оператора Лапласа и систем с постоянной фазой (СРЕ-элементы) [201]. Для подобного синтеза он ввел в теорию электрических цепей новые типы элементов, сочетающих в себе резистивно-емкостные и резистивно-индуктивные свойства. Эти новые элементы им были названы соответственно «реконд» и «реинд» (комбинация из словосочетаний **резистор/кондесатор, резистор/индуктивность**). Рашид

Шакирович провел несколько малых семинаров, излагая круг идей, полученные им результаты и направление дальнейших исследований. К сожалению, довести это дело до конца ему не удалось.

В настоящее время это направление продолжает развивать докторант кафедры А.Х. Гильмутдинов, приглашенный Рашидом Шакировичем на кафедру для исследований в области синтеза пленочных распределенных систем для микроэлектронных приложений. Им получен ряд новых результатов по анализу и синтезу резистивно-емкостных неоднородных структур с распределенными параметрами, например, исследованы спектральные свойства фрактальных структур с топологией «ковер» Серпинского и с другими типами топологий.

Другое научное направление, связанное с обработкой сигналов и, прежде всего, с фильтрацией инфранизкочастотных сигналов с помощью электролитических элементов, развито в работах В.А. Белавина, В.А. Козлова, Р.Г. Насыровой, Т.Ф. Щербаковой и др. Теоретической основой этого направления была базовая идея Р.Ш. Нигматуллина об использовании свойства большой инерционности частиц молекулярных размеров для построения частотно-селективных элементов в области инфранизких частот ($0,001 \div 1$ Гц). Эти элементы, имея очень малые габариты и малое энергопотребление, позволяют создавать устройства для аналогового интегрирования и накопления информации. Основная область применения подобных устройств – сейсмология и океанология, исследование сверхнизкочастотных процессов в природных, технических и технологических системах. Один из примеров – обнаружение и предупреждение о надвигающихся цунами.

Учеными школы Р.Ш. Нигматуллина проведен большой объем исследований и разработок в этой области, получены уникальные научные результаты. Разработаны теория и методы многокомпонентного обнаружения и идентификации одиночных сверхнизкочастотных сигналов (И.К. Насыров), а также созданы и внедрены соответствующие системы измерения и идентификации (И.К. Насыров, В.И. Немтарев, К.В. Сиразиев, С.И. Куншин, В.В. Петровский и др.).

Большое развитие в работах ученых школы Р.Ш. Нигматуллина и научное признание получило направление по разработке электрохимических методов, датчиков и приборов для исследования турбулентности. Показательна и поучительна история возникновения и развития этого направления на кафедре.

В основе измерения потоков лежала следующая идея Р.Ш. Нигматуллина. При наличии конвекции основное сопротивление переносу заряда в электрохимической ячейке сосредоточено в тончайшем приэлектродном слое толщиной порядка десяти микрон – в диффузионном пограничном слое. При изменении гидродинамического режима (скорости потока, касательного трения) вблизи электрода толщина слоя меняется, изменяя поверхностный градиент концентрации, а следовательно, и ток через электрод. В эквивалентной

электрической модели, как указывал Р.Ш. Нигматуллин, это приводит к параметрической модуляции эффективной длины РС-кабеля. Это свойство можно было положить в основу принципа работы датчиков стационарных и пульсационных характеристик скорости потока и касательного трения. Важное преимущество электрохимических датчиков, помимо их высокой чувствительности и миниатюрности, состоит еще в том, что электроды монтируются заподлицо в обтекаемую потоком стенку и не искажают кинематическую структуру течения.

Как вспоминал впоследствии Р.Ш. Нигматуллин, он неоднократно предлагал сотрудникам начинать исследования в этом направлении, однако подходящих кандидатур, желающих разрабатывать эту тему, не находилось. Проблема была в том, что тема находилась на стыке нескольких наук – электрохимии, физико-химической гидродинамики, измерительной техники и электроники. Не было также на кафедре соответствующей экспериментальной базы. Поэтому тема была весьма трудной для молодых сотрудников и аспирантов и «потянуть» ее они не могли. В силу этих причин плодотворная идея датчика потока оказалась «замороженной» на многие годы и была упущена приоритетность направления.

В 1963 году в США была опубликована работа Т. Ханратти и его коллег из Иллинойского университета. В ней экспериментально и теоретически было обосновано применение электрохимической ячейки для измерения касательного напряжения – силы трения потока на единицу площади обтекаемой поверхности. Этот трудноизмеримый параметр играет исключительно важную роль при исследовании и создании быстроходных надводных и подводных аппаратов. На сегодняшний день электрохимический метод считается одним из лучших инструментальных методов исследования пристенной турбулентности. В последние годы метод получил широкое распространение в ведущих исследовательских лабораториях США, Франции, Англии, Германии и Японии.

После зарубежной публикации 1963 года нужно было наверстывать упущенное – начинать запоздалые работы над датчиком потока. Первыми в этом направлении были работы Г.Г. Габсалямова. Им совместно с Р.Ш. Нигматуллиным был разработан и запатентован в 1966 году электрохимический датчик скорости потока.

В начале 70-х годов в КАИ совместно с Институтом электрохимии АН СССР (научные руководители работ – Р.Ш. Нигматуллин и зам. директора ИЭЛАН профессор Б.М. Графов) были начаты обширные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по измерению поверхностного трения в морской воде в натуральных условиях (В.А. Белавин, Л.А. Соколов, В.А. Михайлов, Г.Г. Габсалямов, С.А. Старцев и др.). Особенность этих НИР состояла в том, что метод измерения поверхностного трения был реализован на времяпролетном принципе. Метод позволил свести измерение касательного трения к высокоточным временным или частотным измерениям [106, 148]. По сравнению с амплитудным методом Т. Ханратти этот

метод имеет более высокую точность, а также дает возможность проводить измерения не только в лабораторных, но и в натуральных (морских) условиях.

В настоящее время времяпролетный метод является общепризнанным инструментальным методом [106, 108, 115, 122, 124, 148]. Таким образом, определенный баланс в области электрохимических методов измерений потоков был достигнут.

В этот же период в 1973 году по инициативе Р.Ш. Нигматуллина в КАИ была развернута НИР с Казанским филиалом ВНИИФТРИ по разработке системы измерения статистических параметров нестационарной турбулентности на основе электрохимических датчиков. В рамках этих исследований был предложен электрохимический корреляционный метод измерения поверхностного трения в развитых турбулентных потоках и разработана его теория (Р.Ш. Нигматуллин, Ю.К. Евдокимов) [124]. Дальнейшие исследования в этой области привели к разработке теории многоэлектродных и матричных электродиффузионных датчиков для исследования турбулентности и соответствующих автоматизированных измерительных систем (Ю.К. Евдокимов, Д.В. Погодин, С.А. Старцев).

Теоретическим обобщением работ, проводимых в области сенсорных систем, стала предложенная автором этих строк концепция распределенной измерительной среды и разработанная в ее рамках теория и методы измерения физических полей на основе электрохимических, полупроводниковых и резистивно-емкостных распределенных структур. Это направление исследований было выбрано также с одобрения и при поддержке Р.Ш. Нигматуллина.

В конце 1989 года пришло персональное приглашение Рашиду Шакировичу на участие в Международном конгрессе CHISA-90 в августе 1990 года в Праге, в рамках которого должна была проходить конференция по электрохимической диагностике потоков. Конференция давала возможность впервые встретиться с учеными Востока и Запада, работающими в этой области и знающими друг друга только по публикациям.

К этому конгрессу мы подготовили пленарный доклад по распределенному электрохимическому датчику, в котором впервые представили идеологию распределенных измерений [202]. Докладчиком был заявлен Рашид Шакирович, но примерно за два месяца до конгресса он вызвал меня к себе и рекомендовал ехать

в Прагу с докладом, обосновав тем, что этой проблемой я занимаюсь давно и пора выходить на международный уровень. Так, с благословения Рашида Шакировича состоялась первая поездка за рубеж автора этих строк, после которой последовали многократные поездки во Францию, Германию.

В рамках этого научного направления учеными кафедры были предложены и внедрены в различных организациях методы, приборы и автоматизированные измерительные системы с распределенными датчиками для исследования

турбулентности, параметров движения потоков, температурных полей и т.д., которые позволяют с высокой технической и экономической эффективностью решать множество научных и прикладных задач (Ю.К. Евдокимов, Г.Г. Габсалямов, Е.Ф. Базлов, В.А. Михайлов, Д.В. Погодин, С.А. Старцев, В.В. Краев, Л.Д. Храмов, Р.К. Сагдиев, Я.А. Партс, А.Ф. Байтуллин, А.Ю. Кирсанов и др.). Новизна технических решений этих разработок подтверждена более 30 авторскими свидетельствами и патентами РФ. Экономическую состоятельность этого направления в современных рыночных условиях доказывает годовой объем выполняемых хоздоговорных и госбюджетных НИР, составляющий около 1 млн рублей.

В середине 70-х годов по инициативе Рашида Шакировича были начаты исследования в области твердых электролитов – суперионных проводников. Тогда к изучению свойств твердых электролитов и их использования для функционального преобразования электрических сигналов приступил Ф.А. Карамов – молодой выпускник КГУ. Успешные результаты, полученные Ф.А. Карамовым по этому направлению, стали основой его докторской диссертации. Недавно, в конце 2002 года, в издательстве «Наука» вышла монография Ф.А. Карамова, суммирующая результаты и достижения в этой области.

Каждый человек фактически проживает две жизни. Одна из них – внешняя и видимая, протекающая на людях, а другая – внутренняя жизнь, не менее богатая и сложная. Как мне представляется, обе жизни Рашида Шакировича были гармонично взаимосвязаны, чрезвычайно насыщены и богаты событиями. Большой объем внешнего взаимодействия с самыми различными людьми требовал от Рашида Шакировича огромного объема внутренней душевной работы, проходящей через множество сомнений и раздумий. При этом Рашид Шакирович был легко ранимым человеком. Иногда он признавался, что «вечером дома приходится зализывать раны, полученные днем». Движущей силой и энергией для него были жизнелюбие и оптимизм.

Со временем все яснее и отчетливее мы осознаем масштаб незаурядной личности Рашида Шакировича и благодарим судьбу за представившуюся возможность работать рядом с ним.