Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. Mathematics, computer science, mechanics series, 2026, Vol. 155, №2, P.25-41
http://bulmathmc.enu.kz, E-mail: vest_math@enu.kz

РУБРИКА «ПАМЯТЬ»
МРНТИ: 30.17.02

ВЛАСТЕЛИН ТУРБУЛЕНТНЫХ СТИХИЙ: КАК АКАДЕМИК ЕРШИН ВЫВЕЛ КАЗАХСТАНСКУЮ ГИДРОМЕХАНИКУ НА ОРБИТУ МИРОВОГО ПРИЗНАНИЯ

К 100-летию со дня рождения академика Ш.А. Ершина

У.К. Жапбасбаев
НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева», ул. Сатпаева, 22а, 050013, Алматы, Казахстан
(E-mail: uzak.zh@mail.ru)

Аннотация. Бывают учёные, чьи имена остаются только на пожелтевших страницах диссертаций. А бывают созидатели, способные подчинить капризные законы физики нуждам огромной страны и заставить весь мир в формате противостоящих двух самых мощных военных держав – от Москвы до Вашингтона – прислушаться к голосу казахстанской науки. Именно таким человеком был академик НАН РК, доктор технических наук, профессор Шахбаз Алимгиревич Ершин (05.09.1926–02.08.2019).



В этом году благодарное научное сообщество отмечает вековой юбилей со дня рождения человека, который создал уникальную отечественную школу гидроаэромеханики, заглянул внутрь бушующего пламени и научил уравнения Навье–Стокса работать на благо производства.

На основе монографии «Парадоксы аэрогидродинамики» и работ представителей научной школы Ершина обсуждаются течения вязких и вязкопластичных сред в каналах, влияние диссипативного нагрева на вязкость и сопротивление движению, а также гидродинамические предпосылки локального повреждения нефтепромысловых трубопроводов. Рассматриваются особенности переноса через проницаемые стенки, распределения газа в каталитических аппаратах, развития свободных струй и эволюции вихревых образований. Отдельное внимание уделено влиянию температуры на структуру газовых струй и соотношению процессов смешения, воспламенения и выгорания топлива при сверхзвуковом горении. Показано, что кажущиеся противоречия между привычными представлениями и поведением реального потока могут быть объяснены учётом взаимосвязанных физических процессов и границ применимости расчётных моделей. Подчёркиваются значение сопоставления теории с экспериментом, необходимость различать качественное объяснение и количественное подтверждение, а также роль научной школы в развитии культуры исследования. Представленный обзор раскрывает практическую значимость наследия Ершина для энергетики, нефтяной промышленности и совершенствования технологических аппаратов.

Ключевые слова: аэрогидродинамика, научное наследие Шахбаза Ершина, вязкопластичные среды, вязкая диссипация, свободные струи, вихревые образования, сверхзвуковое горение.

DOI: https://doi.org/10.32523/bulmathenu.2026/2.3

2000 Mathematics Subject Classification: 76A02, 76-03

От ленинградской закваски – к собственному прорыву. Научный взлёт Шахбаза Ершина начался в середине прошлого века в уникальной атмосфере. Его наставником стал легендарный ленинградский теплофизик Лев Абрамович Вулис, работавший в те годы в Казахстане. Именно тогда молодой исследователь навсегда усвоил главное правило: большая наука не должна быть абстрактной. Теория и практика обязаны идти рука об руку.

Уже в 1957–1973 годах, работая в Научно-исследовательском институте энергетики АН КазССР, Ершин совершает прорыв, ставший классикой. Он выступает одним из ключевых создателей **аэродинамической теории газового факела**.

Что это такое? Проще говоря, учёный взялся описать, как ведут себя бурные, хаотичные (турбулентные) потоки газа в момент, когда в них бушует огонь. Понять физику гомогенного горения и то, как фронт пламени укрощает хаотичные пульсации газа, – значило получить ключ к управлению колоссальной энергией.

В 1968 году в Ленинграде выходит совместная монография «Основы теории газового факела» [1]. Этот труд произвел эффект разорвавшейся бомбы среди специалистов. В самый разгар холодной войны оборонные ведомства и космическое агентство США (NASA) заказывают официальный перевод на английский язык. Американские инженеры изучали труды казахстанских физиков, чтобы проектировать реактивные двигатели и ракетные системы. Чуть позже по контрактам U.S. Navy в США переводят и работы Ершина по коаксиальным (вложенным друг в друга) струям. Это был триумф и безоговорочное признание мирового уровня.

«За интересными задачами – поезжайте к Ершину!». В 1973 году ректор Казахского государственного университета Умирбек Джолдасбеков совершает дальновидный шаг – приглашает Шахбаза Алимгиревича на кафедру механики. Именно здесь, в стенах ведущего вуза страны, Ершин разворачивает свою знаменитую кузницу кадров, внедрив железный принцип: *«Исследую – обучаю – исследую»*. К сложной науке он привлекает студентов с первых курсов, заражая их азартом первооткрывателей.

Один из основоположников советской прикладной математики академик Н.Н. Яненко часто говорил своим ученикам в Новосибирске и Москве: «За проблемами езжайте к Ершину – у него в Алма-Ате много интересных задач».

И задач действительно хватало. Ершин и его ученики замахнулись на самые сложные тайны природы – вихри. Они исследовали загадочные структуры Гёртлера–Тейлора, кружащиеся кольцевые вихри (о которых выдающийся советский механик Г.Г. Чёрный писал, что работа алмаатинцев наконец-то раскрыла всю стадию их развития) и поведение сверхзвуковых потоков.

Более того, Шахбаз Алимгиревич одним из первых в республике понял: будущее – за компьютерами. Когда ЭВМ еще занимали целые залы, его ученики уже вовсю занимались **вычислительной гидромеханикой**, рассчитывая сложнейшие течения внутри пористых труб и химических аппаратов.

Наука на службе степных гигантов. Ершин никогда не запирался в «башне из слоновой кости». Каждое фундаментальное открытие его школы тут же находило дорогу на заводы, электростанции и месторождения. Учёные его школы буквально спасали промышленность от миллиардных убытков и аварий:

Защита нефтепроводов. По заказу Казахского государственного научно-исследовательского и проектного института нефтедобывающей промышленности Команда Ершина разгадала гидродинамическую тайну «ручейкового эффекта», из-за которого внезапно рвались коммуникационные трубы на гигантских месторождениях Жетыбай и Узень (1991г.).

Нефтяные фильтры. Для месторождения Кенкияк был создан уникальный металлокерамический забойный фильтр, который остановил забивание скважин песком (1982г.).

Энергетика. Законы развития турбулентных струй, открытые Ершиным, легли в основу мощных горелок для Ермаковской ГРЭС (ныне Аксуской электростанции) (1970г.).

Экология и космос. Научная школа Ершина разработала способ каталитической очистки токсичных газов, вырабатываемых автомобильными двигателями, и рассчитала сверхзвуковое горение водорода для перспективных гиперзвуковых аппаратов.

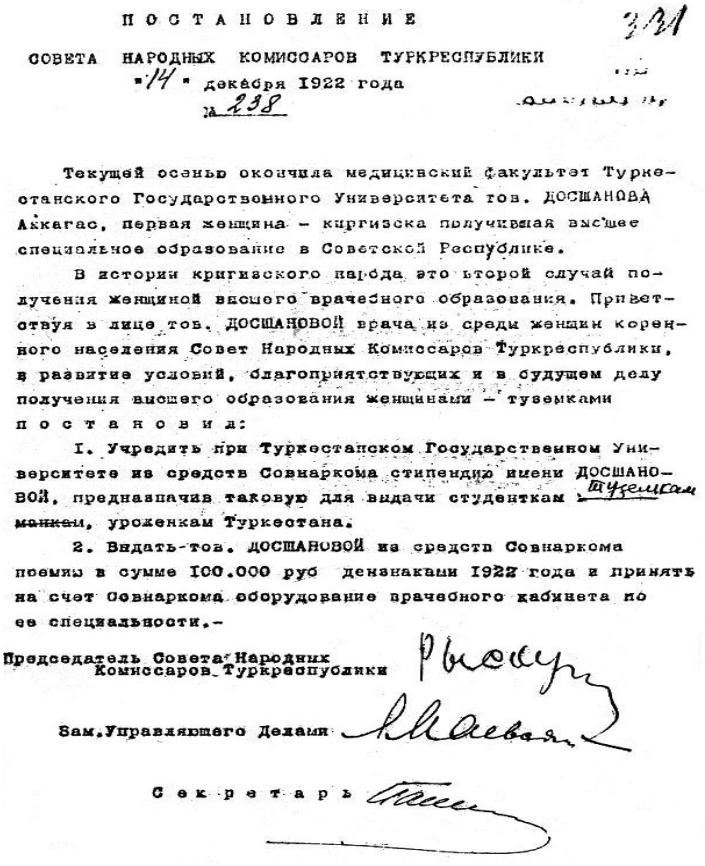
Зелёная энергия. Научная школа Ершина в ветроэнергетике спроектировала эффективную установку «БИДАРЬЕ-1».

Наследие, устремлённое в будущее. Государство высоко оценило заслуги исследователя – звание «Заслуженный деятель науки Казахской ССР», Премия имени К.И. Сатпаева, многочисленные ордена и знаки отличия. Но главным его памятником стала созданная им живая научно-инженерная система.

Под руководством академика Ершина Шахбаза Алимгиревича были защищены 5 докторских и 29 кандидатских диссертаций. Сегодня его ученики и последователи в КазНУ им. аль-Фараби и других научных центрах продолжают развивать заложенные традиции. Они создают программное обеспечение цифрового моделирования энергосбережения при транспортировке нефти по магистральным трубопроводам, строят цифровые двойники водопроводных и тепловых сетей, разрабатывают математические модели для подземного скважинного выщелачивания урановых руд, а также внедряют технологии искусственного интеллекта для оптимизации промышленных и энергетических процессов – и тем самым возвышают Казахстан на позиции мирового лидера отрасли.

Академик Шахбаз Ершин доказал: Казахстанская школа гидроаэромеханики – это не просто строчки в учебниках физики. Это прочный фундамент нашего технологического суверенитета, заложенный выдающимся учёным с мировым именем.

Также отметим причастность Ш.А.Ершина к истории Казахстана не только благодаря его личным научным прорывам, но и по происхождению: Шахбаз-ага - единственный сын Аққағаз Досжановой (1893-1932), первой женщины Востока с советским высшим медицинским образованием (в 2016 году в Актобе на территории Медицинского университета установлен А.Досжановой памятник):



ПОСТАНОВЛЕНИЕ

СОВЕТА НАРОДНЫХ КОМИССАРОВ ТУРКРЕСПУБЛИКИ

«14» декабря 1922 года

№ 238

Текущей осенью окончила медицинский факультет Туркестанского Государственного Университета тов. ДОСЖАНОВА Аккагас, первая женщина – киргизка получившая высшее специальное образование в Советской Республике.

В истории киргизского народа это второй случай получения женщиной высшего врачебного образования. Приветствуя в лице тов. ДОСЖАНОВОЙ врача из среды женщин коренного населения Совет Народных Комиссаров Туркреспублики, в развитие условий, благоприятствующих и в будущем делу получения высшего образования женщинами – туземками

п о с т а н о в и л:

1. Учредить при Туркестанском Государственном Университете из средств Совнаркома стипендию имени ДОСЖАНОВОЙ, предназначив таковую для выдачи студенткам ~~туземкам~~ женщи, уроженкам Туркестана.

2. Выдать тов. ДОСЖАНОВОЙ из средств Совнаркома премию в сумме 100.000 руб денежками 1922 года и принять на счет Совнаркома оборудование врачебного кабинета по ее специальности.-

Председатель Совета Народных Комиссаров Туркреспублики

Зам.Управляющего Делами

Секретарь

Теперь обратимся к научному наследию академика Ш.А. Ершина и сделаем подборку значимых работ его учеников. Почему густая жидкость может течь легче именно потому, что трение при движении её нагревает? Отчего горячая газовая струя при определённых условиях оказывается более упорядоченной, чем холодная? Как вихрь сохраняет свою форму, перемещаясь сквозь окружающую среду? Вопросы такого рода занимали академика Шахбаза Ершина и его учеников. Они возникали на пересечении фундаментальной науки и конкретных задач энергетики, нефтяной промышленности и техники.

Аэрогидродинамика изучает движение жидкостей и газов. Мы сталкиваемся с её проявлениями каждый день: открываем кран, наблюдаем облака, чувствуем ветер, видим, как дым расходится над трубой. Однако привычность этих явлений обманчива. Внутри потока могут одновременно происходить перемешивание, нагрев, изменение свойств вещества, образование вихрей и взаимодействие разных компонентов смеси. Даже простая на вид струя способна поставить перед исследователем сложную задачу.

В год столетия со дня рождения Шахбаза Ершина обращение к его научному наследию позволяет проследить путь от неожиданного наблюдения к физическому объяснению. В монографии «Парадоксы аэрогидродинамики» [2] рассматриваются канальные течения, свободные струи и сосредоточенные вихри. Эти направления объединяет вопрос: какие механизмы заставляют действительный поток вести себя иначе, чем подсказывает первое впечатление?

Научный парадокс возникает, когда расчёт или привычное представление расходятся с наблюдением. Чтобы разрешить расхождение, приходится уточнять условия задачи и искать физический механизм, который ранее не был учтён. Так необычный результат становится основанием для нового объяснения, а затем – для более надёжного инженерного расчёта.

Ниже предлагается пройти такой путь без сложных формул. Мы рассмотрим, что происходит внутри трубы, почему температура влияет на движение, как устроены струи и вихри и чем эти исследования полезны производству. Физические явления объясняются так, чтобы их суть была понятна широкому читателю.

За отдельными задачами постепенно проступает характер исследовательской школы. Её сила заключается в умении связать наблюдение с теорией, проверить объяснение и подготовить людей, способных продолжить работу. Именно с этой точки зрения парадоксы аэрогидродинамики представляют интерес и сегодня.

Почему привычная модель иногда подводит. Чтобы рассчитывать сложное явление, его необходимо упростить. Инженер не может одновременно учитывать каждую неровность трубы, каждую частицу примеси и все мельчайшие изменения скорости. Он выделяет главное и создаёт модель. Например, принимает постоянную вязкость, равномерную температуру или одинаковые свойства жидкости во всём сечении. Если эти предположения соответствуют условиям, модель даёт полезный результат.

Трудности начинаются, когда условия меняются. Труба охлаждается, жидкость густеет, в смеси появляются твёрдые частицы или возле стенки образуется особый слой. Прежний расчёт может сохранять математическую правильность, но уже описывать другой, более простой поток. Поэтому расхождение с опытом требует проверки исходных предположений.

Классический пример – парадокс Даламбера. В определённой постановке для идеальной жидкости математическое описание даёт нулевое сопротивление обтекаемого тела. Между тем любое движение руки в воде показывает, что сопротивление существует. Причина расхождения связана с идеализацией: из модели исключена вязкость, а условия обтекания не воспроизводят все особенности реального течения.

Возле поверхности тела вязкость особенно существенна. При обычном условии прилипания скорость жидкости непосредственно у неподвижной стенки равна нулю, тогда как дальше от неё поток движется. Возникает область резкого изменения скорости. При некоторых условиях поток отрывается от поверхности, и за телом образуется след. Давление впереди и позади перестаёт уравновешиваться так, как в идеализированной картине.

Этот пример помогает понять, почему небольшой по размерам участок может влиять на поведение всей системы. Тонкий слой возле стенки способен определять сопротивление крупного аппарата. Точно так же локальный нагрев или неравномерность состава могут изменить условия перекачки в длинном трубопроводе.

Задача исследователя состоит в выборе достаточной сложности модели. Слишком простое описание пропускает важный механизм. Чрезмерно подробное требует данных, которых нет, и больших вычислительных затрат. Между этими крайностями находится обоснованное решение: учитывать процессы, действительно определяющие рассматриваемое явление.

Труба изнутри и роль вязкости. Когда мы смотрим на поток из крана, легко представить, что вода внутри трубы движется одинаково во всех точках. В действительности скорость распределена по сечению неравномерно. Возле неподвижной стенки жидкость затормаживается, а вдали от неё движется быстрее. Чтобы поддерживать течение, насос должен создавать перепад давления, преодолевающий сопротивление.

Вязкость характеризует способность среды сопротивляться относительному перемещению соседних слоёв. Простую аналогию даёт колода карт: если сдвигать верхнюю часть относительно нижней, отдельные слои перемещаются с разной скоростью. В жидкости такое перемещение сопровождается передачей усилий между слоями. Чем выше вязкость при прочих равных условиях, тем больше усилий требуется для поддержания заданного движения.

При спокойном, установившемся движении ньютоновской жидкости в прямой круглой трубе распределение скорости имеет известную плавную форму: скорость максимальна в центре и уменьшается к стенке. Но эта картина справедлива лишь при соответствующих условиях. В турбулентном потоке интенсивное перемешивание изменяет распределение скорости и механизм переноса импульса.

Нефть, буровой раствор или пульпа могут вести себя сложнее воды. Их свойства зависят от температуры, состава и скорости деформации. Иногда при увеличении интенсивности сдвига кажущаяся вязкость уменьшается. В других средах требуется сначала превысить определённое напряжение, чтобы началось заметное течение. Поэтому слово «жидкость» ещё не определяет подходящую расчётную зависимость.

Есть и геометрическая сторона задачи. Потери давления зависят от диаметра и длины трубы, шероховатости стенки, поворотов и местных сужений. Однако увеличение диаметра само по себе не решает все проблемы: для смеси с оседающими частицами снижение скорости может вызвать накопление твёрдой фазы. Решение приходится искать с учётом свойств конкретной среды.

Такие примеры объясняют, почему исследования канальных течений занимают значительное место в инженерной гидромеханике. Внутри внешне простого трубопровода взаимодействуют свойства вещества, геометрия и режим движения. Изучение каждого из этих факторов помогает понять, где упрощение допустимо, а где оно приводит к ошибке.

Кольцевой канал и движение вязкопластичных сред. Представим одну трубу внутри другой. Между их поверхностями остаётся кольцевой зазор. Такая геометрия встречается в теплообменных аппаратах и в скважинах, где жидкость движется по пространству между колоннами. На первый взгляд кольцевой канал напоминает обычную трубу, но поток теперь взаимодействует сразу с двумя стенками.

При неподвижных стенках жидкость затормаживается и у внутреннего, и у наружного цилиндра. Самая высокая продольная скорость находится между ними. При этом положение максимума нельзя автоматически считать серединой зазора: кривизна поверхностей и соотношение радиусов влияют на распределение скорости. Чем уже зазор по сравнению с радиусами, тем ближе некоторые свойства течения к движению между почти плоскими поверхностями.

Дополнительные особенности появляются, если среда вязкопластичная. Удобная бытовая аналогия – густая паста, которая удерживает форму при слабом воздействии, но начинает деформироваться, когда усилие становится достаточно большим. В инженерной модели это

описывают пределом текучести. Ниже него материал может рассматриваться как практически недеформируемый, а выше – как текущий.

В канале напряжения распределяются неравномерно. Поэтому разные части одной и той же среды могут находиться в разных состояниях. Там, где воздействие достаточно сильное, слои деформируются. В области с меньшими напряжениями может возникнуть ядро, перемещающееся почти без внутреннего сдвига. Оно не обязательно неподвижно: окружающие текучие слои способны переносить его вместе с потоком.

Это различие существенно для понимания задачи. «Пробка», движущаяся как единое образование, и неподвижное отложение на стенке – разные явления. Их нельзя отождествлять только потому, что в обеих областях отсутствует заметная деформация. Чтобы определить состояние среды, нужно учитывать скорость, напряжения и условия контакта со стенкой.

Если внутренний цилиндр смещён относительно наружного, ширина зазора становится неодинаковой. Поток получает возможность перераспределяться, и симметричное описание уже недостаточно. Если цилиндр вращается, появляется ещё один источник движения. В практической задаче геометрия и граничные условия оказываются столь же важны, как свойства жидкости.

Среди работ Ершина заметное место занимают исследования вязких и вязкопластичных сред в кольцевых каналах. Их значение понятно даже без формул: прежде чем рассчитывать давление и расход, необходимо установить, какие участки среды деформируются и каким образом форма канала направляет движение.

Как внутреннее трение нагревает жидкость. Насос передаёт жидкости механическую энергию. Часть её расходуется на преодоление сопротивления и в итоге превращается в тепло. Этот процесс называют вязкой диссипацией. Слово может показаться сложным, но его смысл знаком каждому: движение сопровождается необратимым превращением энергии в тепловую форму.

Если потереть ладони, они согреются. В жидкости нет соприкосновения твёрдых поверхностей в таком же смысле, но относительное движение соседних слоёв тоже требует работы. Чем интенсивнее сдвиг и чем существеннее вязкие напряжения, тем заметнее может быть тепловыделение. В обычном водопроводе этот нагрев часто мал, а в очень вязкой среде способен повлиять на расчёт.

Теперь представим, что вязкость вещества уменьшается с температурой. Так ведут себя многие жидкости в определённых диапазонах. Внутреннее трение нагревает среду, нагрев снижает вязкость, а уменьшение вязкости меняет распределение скорости и требуемый перепад давления. Движение и температура оказываются связанными обратной связью.

Возле стенки градиент скорости нередко велик. Поэтому тепловыделение может быть распределено по сечению неравномерно. Но температура определяется не только тем, где выделяется тепло. Важны его перенос потоком, теплопроводность и теплообмен через стенку. Охлаждаемая труба и теплоизолированный канал при одинаковом расходе могут дать разные результаты.

У нефти и масел зависимость вязкости от температуры особенно сильна: при понижении температуры вязкость растёт по закону, близкому к экспоненциальному. Если трубопровод отдаёт тепло окружающей среде, жидкость у стенки остывает и её вязкость может возрасти многократно по сравнению с вязкостью в центре потока.

В пристеночной области часто велик градиент скорости. Для ньютоновской жидкости местное выделение тепла при сдвиге определяется произведением вязкости на квадрат этого градиента. Если поддерживается перепад давления, снижение вязкости может увеличить расход и мощность, передаваемую потоку. При недостаточном отводе тепла возникает положительная обратная связь: нагрев облегчает движение, а возросшее движение усиливает тепловыделение. В некоторых моделях это приводит к потере устойчивости прежнего режима – явлению, называемому гидродинамическим тепловым взрывом. Термин обозначает резкую перестройку течения, а не обязательно механическое разрушение трубы. При заданном расходе обратная связь и условия перехода могут быть другими.

Охлаждение через стенку, перенос тепла вдоль канала и перераспределение скорости ограничивают саморазогрев. В отдельных режимах возле холодной стенки сохраняется высоковязкая область с малыми скоростями, тогда как основная часть жидкости движется значительно быстрее. Такая область может изменять тепловое сопротивление между потоком и стенкой. Однако её возникновение и размеры зависят от свойств жидкости и условий теплообмена. Для вязкопластичной среды дополнительно требуется установить, превышают ли местные напряжения предел текучести: холодный медленно движущийся слой и неподвижная область с напряжениями ниже предела текучести имеют разные физические основания.

Отсюда возникает кажущийся парадокс: потери механической энергии способны изменить свойства жидкости так, что её движение облегчается по сравнению с расчётом при исходной температуре. При этом энергия не возникает из ничего. Насос продолжает совершать работу, а часть переданной энергии остаётся в веществе в виде тепла или уходит в окружающую среду.

Для инженера важно различать заданный расход и заданный перепад давления. Если поддерживается расход, изменение вязкости влияет на необходимое давление. Если поддерживается давление, может измениться расход. Без указания того, что именно фиксировано, сравнение двух режимов легко становится неоднозначным.

Исследование такого эффекта требует совместного решения гидродинамической и тепловой задач. Измерения вязкости при разных температурах здесь столь же необходимы, как сведения о трубе и насосе. Этот пример показывает, насколько далеко может зайти ошибка, если свойство вещества принять постоянным лишь ради удобства вычислений.

Почему повреждение трубы бывает локальным. Трубопровод выглядит как единая конструкция, но его стенка не обязательно испытывает одинаковое воздействие по всей окружности. Показательна задача из практики нефтепромысловых коммуникаций: повреждение преимущественно вдоль нижней части трубы. Такая локализация требует объяснения, которое нельзя получить из одного среднего значения скорости.

Реальная смесь может включать нефть, воду, газ и твёрдые примеси. Эти компоненты отличаются плотностью и другими свойствами. В зависимости от скорости и режима они распределяются по сечению неодинаково. Сила тяжести способствует расслоению, а турбулентное перемешивание может ему противодействовать. Итоговая картина определяется соотношением этих процессов.

Если воздействие на стенку сосредоточено в узкой зоне, средние характеристики скрывают самое существенное. Представим дождь, который равномерно выпадает на крышу, но затем собирается в водостоке. На выходе из него вода воздействует на маленький участок гораздо сильнее. Это лишь аналогия локализации; действительный механизм в трубе нужно устанавливать отдельно.

Исследования ручейкового эффекта в школе Ершина были связаны с поиском гидродинамического объяснения такого неравномерного воздействия. Для объяснения эффекта важно понять, как поток организован у повреждаемой поверхности и почему именно там условия отличаются от остальных участков.

Одно из гидродинамических объяснений ручейкового эффекта связано с расслоением смеси и волнами на границах её компонентов. В горизонтальной трубе вода и механические примеси могут сосредоточиваться в нижней части, нефть – располагаться выше, а газ – занимать верхнюю область. Межфазные поверхности испытывают возмущения, в том числе связанные с нестационарной работой оборудования. Волны меняют толщину слоёв, распределения скорости и давления. Эти изменения следует рассматривать совместно: для нестационарной многофазной смеси простого применения закона Бернулли недостаточно.

В описании промысловой проблемы на месторождениях Жетыбай и Узень отмечалось преимущественное повреждение труб вдоль нижней образующей. Сосредоточение воды и твёрдых примесей у дна создаёт условия для совместного действия эрозии и коррозии. Частицы могут повреждать защитную поверхность, а контакт металла с водной фазой – способствовать дальнейшему углублению дефектов. Узкая дорожка повреждений получила

название «ручейкового эффекта». При этом скорость разрушения зависит от состава смеси, свойств частиц, материала трубы и режима эксплуатации.

Гидродинамические исследования школы Ершина позволяли рассматривать эту проблему через пространственную организацию потока. Их практический смысл заключался в поиске связи между движением компонентов смеси и локализацией повреждений. Окончательный вывод о механизме разрушения требует сопоставления расчёта с данными обследования труб и составом транспортируемой среды.

Вместе с тем в общем случае разрушение металла может иметь несколько причин. Механическая эрозия, коррозионные процессы и их совместное действие не равнозначны. По внешней форме повреждения нельзя уверенно установить весь механизм. Нужны сведения о составе среды, режимах работы, материале трубы, отложениях и результатах обследования.

Для проверки гипотезы полезно сопоставить расположение повреждения с направлением движения, уклоном трубопровода и изменениями расхода. Лабораторный опыт или численная модель могут показать возможное распределение компонентов и скоростей. Однако расчёт становится убедительным лишь тогда, когда его признаки согласуются с наблюдаемой картиной.

Практическое значение такого подхода состоит в выборе обоснованной меры. Иногда требуется изменить режим, иногда – материал или защиту поверхности, иногда – условия подготовки транспортируемой смеси. Понимание механизма позволяет обсуждать эти решения предметно. Без него ремонт может устранить следствие, оставив причину прежней.

Проницаемая стенка меняет весь поток. В привычной трубе стенка удерживает жидкость внутри. Но существуют каналы, через стенки которых среда поступает в основной поток или отводится из него. Они встречаются в фильтрационных устройствах и технологических аппаратах. Такая стенка становится частью процесса переноса вещества, и расход уже нельзя считать неизменным по длине.

Если через поры жидкость входит в канал, продольный поток постепенно пополняется. Если выходит – расход уменьшается. Меняются скорость, давление и условия движения возле поверхности. Поэтому формулу для непроницаемой трубы нельзя без проверки переносить на такой аппарат: исходные условия существенно отличаются.

Пористую стенку можно представить как множество маленьких путей, соединяющих внутренний поток с окружающей средой. Однако реальные поры имеют сложную форму и разные размеры. Их сопротивление зависит от структуры материала и свойств жидкости. Даже равномерная на вид поверхность может пропускать среду неравномерно, если вдоль неё изменяется давление.

Важен и контакт двух движений: основного, направленного вдоль канала, и поперечного, возникающего через стенку. Пристеночная область перестраивается. Вместе с ней могут измениться перенос тепла, распределение примесей и условия взаимодействия со стенкой. В некоторых задачах именно эти изменения определяют эффективность аппарата.

Исследования школы Ершина включали каналы с проницаемыми перегородками и задачи фильтрации. Среди приложений упоминается нефтепромысловый фильтр. Его назначение помогает понять инженерный смысл: необходимо пропустить жидкость и одновременно ограничить поступление нежелательных частиц, обеспечив приемлемое сопротивление.

В каталитическом аппарате добавляется ещё один процесс – химическое превращение на активной поверхности. Теперь движение определяет, насколько быстро вещество достигает зоны реакции, а реакция и теплообмен могут влиять на свойства среды. Рассмотрение одного лишь расхода уже не даёт полного ответа о работе устройства.

Показателен пример проточного каталитического реактора [3]. Газ движется в свободной части аппарата, проходит через слой зернистого катализатора и снова выходит в свободное пространство. В этих областях применяют разные описания: уравнения движения свободного потока и модель фильтрации в пористой среде. При достаточно малых скоростях фильтрации основой может служить закон Дарси; при существенном влиянии инерции нужны дополнительные члены сопротивления. На границах областей необходимо согласовать

массовый поток и условия передачи механических воздействий. Скорость, усреднённая по всему сечению пористой среды, при этом отличается от скорости непосредственно в порах.

В рассматриваемом примере за слоем катализатора на профиле скорости появляются «уши» – повышенные значения вблизи стенок при меньшей скорости в центре. Такое распределение может быть связано с неоднородной структурой засыпки. У стенки укладка зёрен отличается от укладки в глубине слоя, что способно увеличить местную пористость и проницаемость. Часть газа проходит по пути меньшего сопротивления и меньше взаимодействует с катализатором. Для конструктора это важный сигнал: правильного среднего расхода недостаточно, если поток распределён по сечению неравномерно.

Здесь особенно ясно видно, как граница расчётной области влияет на результат. Стенка не всегда является пассивной геометрической поверхностью. Её проницаемость, температура и свойства способны изменить весь поток. Для правильного описания нужно знать не только то, что происходит внутри канала, но и каким образом канал взаимодействует с окружающей средой.

Можно ли снизить сопротивление добавлением жидкости. Интуитивно кажется: если через трубу проходит больше жидкости, насос должен работать тяжелее. При неизменных свойствах среды и прочих сопоставимых условиях увеличение расхода действительно требует большего перепада давления. Но ситуация меняется, когда добавляемая жидкость имеет другие свойства и перестраивает пристеночную область.

Представим основной поток очень вязкой среды. Именно возле стенки возникают значительные изменения скорости и передаются усилия от жидкости к поверхности. Если через пористую стенку подавать менее вязкую жидкость, при подходящих условиях там может сформироваться слой с меньшим сопротивлением сдвигу. Он облегчает относительное движение основной среды и стенки.

Такой эффект удобно сравнить со смазкой, хотя внутри трубопровода картина сложнее обычного смазывания механизма. Толщина слоя меняется, жидкости могут перемешиваться, а подача через поры влияет на распределение скорости. Чтобы получить снижение сопротивления, необходимо определённое сочетание свойств и режима.

Поэтому итог нельзя предсказать из одного факта добавления жидкости. Если она быстро смешивается с основной средой, выраженный пристеночный слой может не сохраниться. Если подача чрезмерна, увеличение расхода способно перевесить благоприятное изменение распределения вязкости. Важны также длина участка и условия формирования слоя.

В школе Ершина этот вопрос изучали численно – на примере вдува маловязкой среды через пористую стенку. Для широкого читателя здесь интересно то, что изменение малого участка сечения способно заметно повлиять на общий результат. Причина заключается в особой роли пристеночного переноса импульса.

Для инженерной оценки нужно рассматривать всю систему. Снижение перепада давления на основном участке ещё не означает уменьшения суммарных энергетических затрат. Дополнительную жидкость требуется подать, подготовить, а иногда затем отделить. На эти операции тоже расходуются энергия и ресурсы. Практическая выгода определяется полным балансом.

Что сетка делает с потоком. Обычная сетка кажется слишком простым предметом для серьёзного исследования. Через её отверстия проходит воздух или вода, часть энергии теряется, и на этом описание можно было бы закончить. Но если посмотреть на движение внимательнее, обнаружится множество маленьких струй и следов, возникающих вокруг элементов сетки.

Перед сеткой поток затормаживается и перераспределяется. В отверстиях он ускоряется, а за перемычками возникают области пониженной скорости. Дальше отдельные струи взаимодействуют, следы расширяются и постепенно перемешиваются. Поэтому условия непосредственно за сеткой отличаются от условий на некотором расстоянии от неё.

Сетка способна одновременно создавать мелкие возмущения и изменять крупную неравномерность потока. Именно поэтому её действие нельзя описать словами «успокаивает»

или «возмущает» без указания места наблюдения и режима. Результат зависит от размера ячеек, толщины элементов, открытой площади и скорости среды.

Интересным свойством течения через сетку оказалось «преломление» линий тока. Если поток набегает на сетку под углом, то за ней он движется уже в другом направлении – ближе к перпендикуляру к её плоскости. В экспериментах этот эффект был отчётливо зафиксирован и описан эмпирической формулой.

Наклонная сетка оказывает различное воздействие на составляющие движения и способна уменьшать составляющую скорости вдоль своей плоскости. Для установившегося несжимаемого потока сохранение массы обеспечивает непрерывность суммарного расхода через сетку. При одинаковой площади сравниваемых сечений это означает равенство усреднённой нормальной скорости, но не сохранение её локального значения в каждой точке: в отверстиях поток ускоряется, а за перемычками образуются следы. Изменение отношения усреднённых составляющих скорости поворачивает поток ближе к нормали. Сравнение с преломлением света наглядно, однако здесь механизм связан с сопротивлением препятствий и перераспределением импульса.

Пакет из нескольких сеток добавляет новые условия. Важны расстояния между ними и взаимное расположение ячеек. Если следующая сетка стоит слишком близко, она воспринимает ещё не выровнявшийся поток. Если расстояние достаточно велико, часть неоднородностей успевает ослабнуть. Одновременно каждое дополнительное препятствие увеличивает потери давления.

Эти особенности существенны для аппаратов, где необходимо распределить поток по рабочему сечению. Неравномерная подача может ухудшить теплообмен, перемешивание или условия измерения. Поэтому выбор сетки связан с компромиссом: получить нужную структуру движения при допустимых энергетических потерях.

Свободная струя и воздух вокруг неё. Поток внутри трубы ограничен стенками. После выхода из отверстия он становится свободной струёй и начинает взаимодействовать с окружающей средой. Граница между движущейся и первоначально неподвижной жидкостью или газом не остаётся резкой: через неё передаются импульс, тепло и вещество, развивается перемешивание.

Наглядный пример – струя воздуха из вентилятора. На некотором расстоянии она становится шире, а её скорость в центральной области уменьшается. Причина не сводится к простому «расходованию силы». Струя вовлекает окружающий воздух в движение, и исходный импульс распределяется между большим количеством вещества.

Это вовлечение называют эжекцией или захватом окружающей среды. Если представить поток как узкую ленту быстро движущегося воздуха, её соседние слои постепенно начинают двигаться вместе с ней. При турбулентном режиме обмен усиливается вихревыми движениями. Струя расширяется, а её структура меняется по направлению движения.

В реальном устройстве картина зависит от формы отверстия, начальной скорости, плотности струи и окружающей среды. Горячий лёгкий газ испытывает действие плавучести. Тяжёлая струя может отклоняться иначе. Если поблизости есть стенка или встречный поток, свободное развитие нарушается и возникают дополнительные взаимодействия.

Несколько струй способны сливаться, усиливать перемешивание или создавать сложные области рециркуляции. В коаксиальной системе одна струя окружает другую. Так можно управлять подачей компонентов и обменом между ними. Однако результат зависит от соотношения скоростей и плотностей, а не только от расположения сопел.

Исследования свободных струй составляли одно из основных направлений школы Ершина. Они были связаны с теорией газового факела и разработкой горелочных устройств. Это понятная связь: прежде чем топливо сгорит, оно должно встретиться с окислителем в подходящих условиях.

Почему нагрев меняет турбулентность. Турбулентное движение часто описывают как хаотическое. Скорость в одной точке колеблется, возникают вихри разных размеров, соседние участки интенсивно перемешиваются. Тем не менее такое течение подчиняется физическим

законам. Его свойства определяются взаимодействием инерции, вязкости, геометрии и внешних воздействий.

Для оценки режима широко используют число Рейнольдса. Без формулы его смысл можно выразить так: оно сопоставляет стремление потока сохранять движение с действием вязкости, сглаживающей различия скорости. При одинаковой геометрии высокая скорость обычно усиливает роль инерции, а большая кинематическая вязкость – роль вязкого воздействия.

Поэтому один и тот же показатель скорости ещё не означает одинакового поведения двух сред. Холодный и горячий газ различаются плотностью и вязкостью. У многих газов динамическая вязкость при нагревании возрастает, а плотность при сопоставимом давлении уменьшается. В результате относительная роль вязкости может заметно усилиться.

При подходящих условиях это способствует ослаблению пульсаций и сохранению более упорядоченного движения горячей струи. Так появляется неожиданность: высокая температура не обязательно сопровождается более сильной турбулентностью. Однако нужно помнить, что при нагревании могут изменяться и скорость, и размеры потока, и другие параметры.

В пламени картина ещё сложнее [1]. Тепловое расширение, неодинаковая плотность, градиенты температуры и взаимодействие фронта реакции с потоком могут создавать собственные неустойчивости. Поэтому утверждение о подавлении пульсаций относится к определённым условиям и участкам течения. Его нельзя превращать в правило для любого горения.

Работы Ершина и его коллег по высокотемпературным струям и газовому факелу обращают внимание именно на связь свойств вещества и структуры движения. Для читателя здесь важен общий вывод: поток определяется целой совокупностью условий. Температура способна менять сам механизм движения, поэтому её учёт не ограничивается расчётом количества передаваемого тепла.

От теории факела к работе горелки. Газовый факел знаком по пламени горелки. Но за его видимой формой скрывается совместное действие аэродинамики, теплопереноса и химических реакций. Топливо должно смешаться с воздухом, воспламениться и сгореть в подходящем пространстве. При этом движение определяет, где встречаются реагенты и сколько времени они находятся в зоне реакции.

Если смешение недостаточно, часть топлива может не успеть полностью окислиться. Если организация потока не соответствует режиму, пламя способно стать неустойчивым. Чрезмерно интенсивное движение тоже не всегда полезно: условия удержания фронта горения зависят от соотношения скоростей потока и процессов воспламенения.

Поэтому разработка горелки требует ответа на несколько связанных вопросов. Как подать воздух и топливо? Где обеспечить перемешивание? Каким образом удержать пламя в рабочей зоне? Как распределить тепловыделение, чтобы оно соответствовало назначению установки? Геометрия сопел и каналов становится инструментом управления этими процессами.

Научные истоки Ершина связаны с теплофизиком Львом Вулисом. Вместе с Л.А. Вулисом и Л.П. Яриным он написал монографию «Основы теории газового факела» (1968) [1]. Этот цикл работ показывает, почему исследование струй было важно одновременно для фундаментальной науки и энергетики.

Результаты исследования турбулентных струй применялись при разработке горелочных устройств для Ермаковской ГРЭС (ныне Аксуская ГРЭС). Применение этих результатов показывает, как понимание движения даёт основу для организации смешения и горения. Характеристики конкретной горелки определяются её конструкцией и проверяются при испытаниях в рабочих условиях.

Высокотемпературные и сверхзвуковые потоки требуют ещё более сложного описания. Там существенны сжимаемость газа, изменение температуры и короткое время взаимодействия компонентов. Модель, пригодная для спокойной лабораторной струи, должна быть существенно уточнена. Проверка её применимости становится самостоятельной частью исследования.

Теория факела поэтому представляет собой пример задачи, в которой процессы нельзя изолировать друг от друга. Движение влияет на реакцию, реакция выделяет тепло, тепло меняет плотность и вязкость, а эти изменения перестраивают поток. Научная работа ищет согласованное объяснение всей этой цепочки и условия, в которых она обеспечивает устойчивую работу устройства.

Вихревые структуры на криволинейной поверхности. Вода, движущаяся по изгибу, меняет направление. Для этого необходимы силы, удерживающие поток на криволинейной траектории. Внутри жидкости возникают соответствующие распределения давления и скорости. Если их сочетание неблагоприятно для устойчивости, первоначально плавное движение может перестроиться и образовать регулярные вихревые структуры.

Удобная аналогия – движение автомобиля по повороту. Чем выше скорость и чем круче поворот, тем заметнее требование к силам, изменяющим направление движения. Но в жидкости соседние слои могут двигаться с разной скоростью и обмениваться веществом. Поэтому вопрос устойчивости сложнее поведения одного твёрдого тела.

При течении вдоль вогнутой поверхности в пограничном слое могут возникать продольные вихри Гёртлера. Они переносят жидкость между участками, расположенными ближе к стенке и дальше от неё. В результате поверхность испытывает неодинаковое воздействие по ширине, а теплообмен может стать существенно неравномерным.

Другой известный пример – жидкость между вращающимися цилиндрами. При определённых сочетаниях вращения и свойств среды возникают вихри Тейлора. Здесь характерные образования имеют другую ориентацию, чем продольные вихри возле вогнутой стенки. Объединяет эти задачи роль криволинейного движения и центробежных механизмов неустойчивости.

Исследования таких структур вели Ершин и его ученики. Их значение выходит за рамки красивой картины течения. Вихри изменяют перемешивание, перенос импульса и тепла. Следовательно, они могут влиять на работу аппарата даже тогда, когда средние расход и температура остаются прежними.

Вихревое кольцо переносит движение. Дымовое кольцо – один из самых наглядных объектов гидромеханики. Оно имеет узнаваемую форму и некоторое время перемещается как единое образование. Дым делает движение видимым, но основную структуру создаёт вращающийся воздух. Подобные кольца могут существовать и в воде, где для наблюдения используют окрашенную жидкость или частицы.

Внутри кольца среда движется вокруг его поперечного сечения. Если мысленно разрезать кольцо плоскостью через ось, можно увидеть две области вращения, относящиеся к одной пространственной структуре. Это вращение создаёт поле скоростей, благодаря которому кольцо перемещается в окружающей среде.

Вихрь способен переносить вовлечённое вещество, но его граница не является твёрдой оболочкой. Он взаимодействует с окружением, изменяет форму и постепенно теряет первоначальные свойства. Поэтому сравнение с движущимся предметом полезно лишь отчасти: внутри такого «предмета» непрерывно происходит собственное движение.

Скорость поступательного движения кольца зависит от его размеров и интенсивности вращения. Существенна и толщина вихревого ядра. В простых теоретических описаниях тонкого кольца эти величины связаны между собой, но переносить такое описание на любое реальное кольцо нельзя. Толстое ядро, близкая стенка или сильная деформация требуют других уточнений.

Вязкость постепенно сглаживает распределение вращения и меняет ядро. При некоторых режимах на кольце возникают колебания и неустойчивости, которые приводят к более сложной структуре. Поэтому наблюдаемое сохранение формы является временным и зависит от условий. Вихревое кольцо не отменяет потерь энергии в реальной среде.

Исследования кольцевых вихрей занимали важное место в работах Ш. Ершина и А. Калтаева [4]. Для популярного читателя этот пример особенно полезен: он показывает, что сложный

поток способен образовать устойчивую на определённом этапе структуру. Порядок возникает внутри движения, которое легко принять за хаос.

Изучая кольцо, исследователь получает возможность отдельно рассмотреть образование, перемещение и распад вихря. Эти этапы помогают понять перенос вещества и импульса в более сложных течениях. Наглядный опыт оказывается входом в общую проблему: как вихревые структуры организуют движение и каким образом взаимодействуют с окружающей средой.

Численный эксперимент и продолжение научной школы. Многие процессы внутри трубы, фильтра или горячего факела трудно наблюдать непосредственно. Прибор измеряет давление в отдельных точках, датчик показывает температуру, расходомер даёт общий расход. Но эти данные ещё не раскрывают всю внутреннюю картину. Численное моделирование помогает связать измерения с распределениями скорости, давления и температуры.

Расчётную область делят на небольшие элементы и для них решают уравнения сохранения массы, импульса и энергии. Компьютер последовательно находит согласованное состояние потока. Такой подход позволяет сравнивать варианты геометрии и режимы, исследовать влияние отдельных факторов и проверять физические гипотезы.

Однако подробная цветная картина не является доказательством сама по себе. Результат зависит от модели вещества, условий на границах и разрешения расчёта. Если неизвестна вязкость или неправильно задана температура стенки, увеличение числа элементов не устранит исходную ошибку. Нужна проверка по независимым данным и оценка устойчивости результата к принятым предположениям.

Ершин уделял большое внимание численному моделированию, в том числе при подготовке учеников. Здесь важна исследовательская последовательность: поставить содержательный вопрос, выбрать описание, выполнить расчёт и сопоставить его с опытом. Компьютер расширяет возможности этого подхода, но не заменяет понимание физики.

Сверхзвуковое горение: продолжение идей научной школы. Продолжение этого исследовательского подхода можно увидеть в работе У.К. Жапбасбаева и Е.П. Макашева [5]. В задаче о горении водородной струи сходятся несколько тем: смешение потоков, влияние температуры, изменение геометрии канала и химические реакции. Связь с наследием школы заключается в самом способе постановки вопроса: определить, какой из взаимодействующих процессов управляет наблюдаемым результатом.

В гиперзвуковом прямоточном воздушно-реактивном двигателе поток в камере сгорания остаётся сверхзвуковым. Топливо должно перемешаться с воздухом, воспламениться и выделить тепло за очень короткое время пребывания в камере. Быстрое движение само по себе не гарантирует успешного горения: если реагенты не успевают встретиться, значительная часть топлива может выйти из камеры несгоревшей.

В рассмотренной расчётной схеме по оси канала истекает тонкая струя водорода, окружённая коаксиальным сверхзвуковым потоком горячего воздуха. Сопоставляются канал постоянного сечения и канал, который после начального цилиндрического участка плавно расширяется. Такая постановка позволяет выделить влияние геометрии на смешение и воспламенение. Даже небольшой угол расширения способен изменить время пребывания газа и температурные условия реакции.

Для описания используются уравнения движения, переноса энергии и компонентов реагирующей смеси, а также модель турбулентного переноса. Химическая схема учитывает водород, кислород, воду и промежуточные активные частицы. Эти частицы необходимы для развития цепных реакций. Важна также неоднородность состава: средние концентрации топлива и окислителя ещё не означают, что они хорошо перемешаны на масштабе, где протекает реакция. Приближения расчётной модели должны оцениваться отдельно; наличие сверхзвуковой скорости само по себе не устраняет вязкие процессы, пограничные слои и влияние тепловыделения.

Главный физический вопрос касается расширения канала. Кажется, что дополнительное пространство должно помогать горению. Но в простом случае сверхзвуковой газ при расширении ускоряется и охлаждается. Для реагирующего потока к этому добавляются

тепловыделение, трение и изменение смешения. В рассмотренных режимах расширение задерживает воспламенение и затрудняет завершение горения. Значение имеет не только объём камеры, но и то, как изменяются состояние газа и время контакта реагентов.

Расчётные распределения позволяют отличить место начала реакции от участка полного выгорания топлива. Между ними может лежать протяжённая зона. Повышение температуры входящего окислителя обычно сокращает химическую задержку воспламенения, однако не обязательно обеспечивает быстрое завершение горения. Если смешение остаётся медленным, оно продолжает ограничивать процесс.

Особую роль играют активные частицы – атомы и радикалы, участвующие в цепных реакциях. Их присутствие во входящем потоке может существенно приблизить начало воспламенения к соплу. Однако количество таких частиц определяется не одной температурой: важны давление, состав, способ нагрева и предыстория потока. Поэтому нельзя автоматически приравнивать нагретый чистый воздух к потоку, подготовленному с помощью сгорания топлива.

Это различие особенно существенно в лабораторных установках, где горячий окислительный поток может содержать водяной пар и другие продукты предварительного сгорания. Такой поток по химическому составу отличается от атмосферного воздуха. Его воздействие на воспламенение следует учитывать при сопоставлении расчётов, экспериментов и условий работы двигателя. Более раннее начало реакции при этом ещё не означает, что всё топливо быстрее сгорит.

Так проявляется ещё одна неожиданная связь: химические реакции могут начинаться быстро, а полное сгорание всё равно определяется скоростью смешения. Для конструктора это означает необходимость согласовать подачу топлива, длину камеры и её расширение с тем, где реагенты действительно успевают перемешаться. Вывод относится к рассмотренным условиям; перенос его на другую геометрию или другой режим требует проверки.

Численный эксперимент помогает разделить эти процессы: проследить движение струи, развитие зоны смешения, начало реакции и последующее выгорание. Сопоставление с измерениями устанавливает, насколько достоверно модель описывает каждый этап. Особенно важно различать качественное совпадение картины и количественное воспроизведение измеренных характеристик: первое ещё не гарантирует второго.

Что сохраняет научная школа. Научное наследие складывается из результатов и из способов их получения. В работах, рассмотренных в этой статье, можно выделить общую исследовательскую линию: сначала обнаружить необычное поведение потока, затем установить определяющий механизм и только после этого обсуждать инженерное применение. Такой подход связывает задачи, внешне далёкие друг от друга, – от перекачки вязкой жидкости до горения сверхзвуковой струи.

В юбилейной статье особенно важно различать результаты самого Шахбаза Ершина, совместные работы с коллегами и последующие исследования учеников. Это позволяет точнее увидеть вклад выдающегося исследователя. Продолжение школы проявляется в развитии поставленных вопросов, совершенствовании моделей и обращении к новым объектам, где сохраняется потребность в ясном физическом объяснении.

Для молодого исследователя парадокс полезен как начало работы. Он заставляет проверить очевидное: действительно ли свойства среды постоянны, достаточно ли среднего значения скорости, можно ли пренебречь стенкой, успевают ли реагенты перемешаться? На такие вопросы нельзя ответить одной красивой расчётной картиной. Ответ строится на сочетании теории, измерений и критического обсуждения.

Научная школа передаёт следующему поколению именно такую культуру работы. Ученик осваивает не только уравнения и программы. Он учится замечать противоречие, отличать измеренное от предполагаемого, устанавливать границы результата и обсуждать его практический смысл. Разные темы объединяются общим способом исследования.

Наследие Шахбаза Ершина продолжает представлять интерес благодаря соединению фундаментальных вопросов и задач практики. Неожиданное поведение жидкости или газа

требует внимательного исследования. Умение превратить такое наблюдение в проверяемое объяснение остаётся одной из важных основ научной работы.

Постановки задач и научные результаты приведенных в статье исследований изложены в публикациях [1-5].

Стиль изложения предназначен для широкого читателя.

Список литературы

1 Л.А. Вулис, Ш.А. Ершин, Л.П. Ярин, Основы теории газового факела, Ленинград, Энергия. 1968.
2 Sh.A. Yershin, Paradoxes in Aerodynamics, Springer, 2017.
3 O.A. Vlasov, Sh.A. Yershin, U.A. Zhapbasbayev, Investigation of the aerothermochemical process in a fixed-bed catalytic reactor, Fluid dynamics, 26 (1991), №2, 252-258.
4 А. Калтаев, Ш.А. Ершин, Математическое моделирование эволюции вихревого кольца в вязкой жидкости, Вестник КазГУ. Серия математики, механики, информатики, (1984), № 2, 45–52.
5 У.К. Жапбасбаев, Е.П. Макашев, Некоторые данные сверхзвукового горения неперемешанных газов в расширяющихся каналах, Горение и плазмохимия, 13 (2015) № 1, 3–10.

Турбулентті дүлей ағындар әміршісі: академик Ершин Қазақстан гидромеханикасын әлемдік танымалдыққа қалай жеткізді

Академик Ш.А. Ершиннің туғанына 100 жыл толуына орай

Ұ.Қ. Жапбасбаев
«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» КеАҚ,
Сәтбаев көшесі, 22а, 050013, Алматы қ., Қазақстан

Аннотация. Есімдері диссертациялардың сарғайған беттерінде ғана қалатын ғалымдар болады. Ал физиканың күрделі заңдарын ұлан-ғайыр елдің қажетіне жаратып, бір-біріне қарсы тұрған аса қуатты екі әскери державаға – Мәскеуден Вашингтонға дейін – Қазақстан ғылымының үніне құлақ астыра білген жасампаз тұлғалар да бар. ҚР ҰҒА академигі, техника ғылымдарының докторы, профессор Шахбаз Алимгирейұлы Ершин (05.09.1926–02.08.2019) дәл осындай тұлға еді.

Биыл ризашылығын білдірген ғылыми қауымдастық отандық гидроаэромеханиканың бірегей ғылыми мектебін қалыптастырған, алаулаған жалынның ішкі сырын ашқан және Навье–Стокс теңдеулерін өндіріс игілігіне қызмет еткізген тұлғаның туғанына жүз жыл толуын атап өтуде.

«Аэрогидродинамика парадокстары» монографиясы мен Ершин ғылыми мектебі өкілдерінің еңбектері негізінде арналардағы тұтқыр және тұтқыр-пластикалық орталардың ағысы, диссипативтік қызудың тұтқырлық пен қозғалыс кедергісіне әсері, сондай-ақ мұнай кәсіпшілігі құбырларының жергілікті зақымдануының гидродинамикалық алғышарттары талқыланады. Өткізгіш қабырғалар арқылы тасымалданудың, каталитикалық аппараттардағы газдың таралуының, еркін ағыншалардың дамуы мен құйындық құрылымдар эволюциясының ерекшеліктері қарастырылады. Температураның газ ағыншаларының құрылымына әсеріне және дыбыстан жоғары жылдамдықтағы жану кезінде отынның араласу, тұтану және толық жанып біту үдерістерінің арақатынасына ерекше назар аударылады. Қалыптасқан түсініктер мен нақты ағынның әрекеті арасындағы көрінерлік қайшылықтарды өзара байланысты физикалық үдерістерді және есептік модельдердің қолданылу шектерін ескеру арқылы түсіндіруге болатыны көрсетіледі. Теорияны эксперименттпен салыстырудың маңызы, сапалық түсіндіру мен сандық растауды ажырату қажеттілігі, сондай-ақ зерттеу мәдениетін дамытудағы ғылыми мектептің рөлі атап өтіледі. Ұсынылған шолу Ершин мұрасының энергетика, мұнай өнеркәсібі және технологиялық аппараттарды жетілдіру үшін практикалық маңызын ашады.

Түйін сөздер: аэрогидродинамика, Шахбаз Ершиннің ғылыми мұрасы, тұтқыр-пластикалық орталар, тұтқырлық диссипациясы, еркін ағыншалар, құйындық құрылымдар, дыбыстан жоғары жылдамдықтағы жану.

Master of Turbulent Forces: How Academician Yershin Brought Kazakhstan's Hydromechanics to International Prominence

Commemorating the 100th Anniversary of the Birth of Academician Sh. A. Yershin

U. K. Zhapbasbayev

Non-Profit Joint-Stock Company "K.I. Satpayev Kazakh National Research Technical University", Satpayev Street, 22a, 050013, Almaty, Kazakhstan

Abstract. Some scientists' names remain only on the yellowed pages of dissertations. Others are builders capable of harnessing the intricate laws of physics to meet the needs of a vast country and making the world–from Moscow to Washington, the centres of the two most powerful opposing military superpowers–listen to the voice of Kazakhstan's science. Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Doctor of Technical Sciences, Professor Shakhbaz Alimgireyevich Yershin (5 September 1926–2 August 2019) was one such person.

This year, a grateful scientific community commemorates the centenary of a man who established a distinctive national school of hydroaeromechanics, peered into the heart of raging flames, and put the Navier–Stokes equations to work for industry.

Drawing on the monograph *Paradoxes of Aerohydrodynamics* and publications by members of Yershin's scientific school, this review discusses flows of viscous and viscoplastic media in channels, the effects of dissipative heating on viscosity and flow resistance, and the hydrodynamic conditions contributing to localised damage in oilfield pipelines. It examines transport through permeable walls, gas distribution in catalytic apparatuses, the development of free jets, and the evolution of vortical structures. Particular attention is paid to the effects of temperature on the structure of gas jets and the interplay between mixing, ignition, and fuel burnout during supersonic combustion. The review shows that apparent contradictions between conventional understanding and actual flow behaviour can be explained by accounting for interconnected physical processes and the limits of applicability of computational models. It emphasises the importance of comparing theory with experiment, distinguishing qualitative explanations from quantitative validation, and the role of a scientific school in cultivating a research culture. The review highlights the practical significance of Yershin's legacy for the energy sector, the oil industry, and the improvement of technological apparatuses.

Keywords: aerohydrodynamics, scientific legacy of Shakhbaz Yershin, viscoplastic media, viscous dissipation, free jets, vortical structures, supersonic combustion.

References

1 L.A. Vulis, Sh.A. Yershin and L.P. Yarin, Osnovy teorii gazovogo fakela [Fundamentals of Gas Flame Theory], Energiya, Leningrad, 1968. [in Russian]

2 Sh.A. Yershin, Paradoxes in Aerodynamics, Springer, 2017.

3 O.A. Vlasov, Sh.A. Yershin and U.A. Zhapbasbayev, Investigation of the aerothermochemical process in a fixed-bed catalytic reactor, *Fluid Dynamics* 26 (1991), no. 2, 252–258.

4 A. Kaltayev and Sh.A. Yershin, Matematicheskoe modelirovanie evolyutsii vikhrevogo koltsa v vyazkoi zhidkosti [Mathematical Modeling of the Evolution of a Vortex Ring in a Viscous Fluid], *Vestnik KazGU. Seriya matematiki, mekhaniki, informatiki [Bulletin of Kazakh State University. Mathematics, Mechanics, and Informatics Series]* (1984), no. 2, 45–52. [in Russian]

5 U.K. Zhapbasbayev and E.P. Makashev, Nekotorye dannye sverkhzvukovogo goreniya neperemeshannykh gazov v rasshiryayushchikhsya kanalakh [Some Data on Supersonic Combustion of Unmixed Gases in Expanding Channels], *Gorenie i plazmokhimiya [Combustion and Plasma Chemistry]* 13 (2015), no. 1, 3–10. [in Russian]

Сведения об авторе:

Жапбасбаев Узак Кайрбекович – доктор технических наук, профессор, лауреат Государственной премии Республики Казахстан в области науки и техники имени аль-Фараби 2019 года, НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева», ул. Сатпаева, 22а, 050013, Алматы, Казахстан.

Zhapbasbayev Uzak Kairbekovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Laureate of the 2019 Al-Farabi State Prize of the Republic of Kazakhstan in Science and Technology, Non-Profit Joint-Stock Company "K.I. Satpayev Kazakh National Research Technical University", Satpayev Street, 22a, 050013, Almaty, Kazakhstan.

Поступила: 27.06.2026. *После повторной редакции: 07.09.2026.*
Одобрена: 19.10.2026. Доступна онлайн: 31.10.2026.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).