

УДК 533 (092)

# Из истории создания теории струйных течений газа. 2

(к 60-летию начала исследований по теории газовых струй в Саратовском университете)

**Н. Н. Макеев**

Институт проблем точной механики и управления РАН

Россия, 410028, г. Саратов, ул. Рабочая, 24

nmakeyev@mail.ru; (845) 272-35-33

Приводятся фрагменты истории возникновения и развития научных исследований по динамике струйных течений газа, проводимых на кафедре теоретической механики и аэрогидромеханики Саратовского государственного университета в период с 1957 по 1989 гг.

**Ключевые слова:** газовая динамика; теория газовых струй; история механики; история Саратовского университета.

DOI: 10.17072/1993-0550-2019-2-81-88

## Становление и формирование теории газовых струй

Истоки возникновения теории газовых струй и газовой динамики в целом восходят к фундаментальному классическому труду С.А. Чаплыгина (1869–1942) "О газовых струях" [1], впервые опубликованному в 1902 г., который считается фундаментом современной газовой динамики.

Эта основополагающая работа значительно опередила науку того времени и поэтому не была воспринята как актуальная. Ее публикация первоначально не вызвала научного интереса и она в историческом плане повторила судьбу выдающейся работы И.В. Мещерского (1859–1935) "Динамика точки переменной массы" [2, 3]. Читателям этих работ была не вполне ясна их перспективность и прикладное значение, поэтому в то время они не были по достоинству оценены научным сообществом. Эти работы были забыты на долгие годы и только спустя три-четыре десятилетия эти оригинальные исследования обратили на себя всеобщее внимание.

В 1932 г. в журнале "Доклады Академии наук Франции" ("Rapports de l'Academie Francaise des Sciences") было опубликовано из-

ложение этого исследования и отмечены содержащиеся в нем основополагающие научные выводы, которые впервые были четко и обоснованно сформулированы. В 1932–1933 учебном году в Сорбонне А. Вилла (Villat Henri-Rene, 1879–1972)<sup>1</sup> начал читать курс лекций, содержащий изложение работы С.А. Чаплыгина [1].

В 1935 г. с 30 сентября по 6 октября в Риме проходил Всемирный научный конгресс, созданный Итальянской Академией наук в ознаменование 190-летия ее основателя, выдающегося физика А. Вольты (1745–1827). Конгресс был посвящён проблемам аэродинамики больших скоростей и развитию авиации. На конгрессе работа С.А. Чаплыгина [1] получила высокую оценку со стороны докладчиков – таких признанных исследователей-аэродинамиков, как Л. Прандтль (Prandtl Ludwig, 1875–1953), Т. Карман (Karman Theodore von, 1881–1963), Дж. Тейлор (Taylor Geoffre, 1886–1975). По оценкам докладчиков исследования С.А. Чаплыгина были признаны крупнейшим вкладом в мировую науку и без ссылок на его работу на конгрессе не обходился ни один докладчик.

<sup>1</sup> Вилла Анри Рене – выдающийся французский математик и механик, член Парижской АН (1932). Профессор гидромеханики Парижского факультета наук Сорбонны (ныне – ун-т Париж – Юг) XI.

С этого времени забытая ранее работа С.А. Чаплыгина получила всеобщее мировое признание.

В 1944 г. в США журнал "*Технические записки*" ("*Technical notes*") опубликовал полное содержание работы С.А. Чаплыгина [1] на английском языке. Этот труд был также опубликован в американском научном журнале "*Труды NASA*" ("*Proceedings of the National Aeronautics and Space Agency*").

Наступило время, когда количество публикаций, основанных на положениях этой работы, начало возрастать и его классическая работа стала одной из наиболее авторитетных и цитируемых работ по гидромеханике.

Исследование С.А. Чаплыгина явилось определяющим фактором, инициирующим развитие методов исследования задач динамики газа. Побудительным мотивом этого явилась исключительная эффективность применения идеи его работы об интегрировании уравнений газовой динамики с использованием непрерывного однозначного отображения области плоскости течения газа в соответствующую область плоскости годографа скорости, где нелинейные уравнения движения газа преобразуются в линейные. Такой прием позволял свести поставленную задачу к линейной краевой задаче.

Новым этапом в развитии теории плоских газовых струй при дозвуковых скоростях явилась передовая работа С.В. Фальковича (1911–1982) [4]. Публикация этой работы явилась отправным пунктом в становлении научной школы теории газовых струй, образовавшейся в Саратовском университете. Она не только вызвала появление многочисленных исследований по этому направлению, но и открыла новый, более совершенный инструмент системного научного исследования свойств стационарных дозвуковых потенциальных струйных течений газа.

В этой работе метод С.А. Чаплыгина был аналитически существенно развит и усовершенствован. Этот расширенный метод, впоследствии названный в литературе *методом Чаплыгина–Фальковича*, открыл путь к решению плоских задач потенциальных дозвуковых течений газа с несколькими характеристическими скоростями.

В дальнейшем данный метод был модифицирован путем применения в плоскости годографа скорости приема А. Макки (А. Магки) [5, 6]. Этот модифицирующий прием со-

стоит в представлении функции тока в замкнутой конечной форме, в силу чего все интегральные характеристики струйного течения выражаются явно через *контурные интегралы*. Такой подход позволяет получать решение газоструйных задач в аналитической форме, единой для всей области течения на плоскости годографа скорости.

Впоследствии результаты, полученные в работе [4], были обобщены на случай, при котором прямоугольные стенки насадка канала заменены двумя симметрично расположенными и произвольно наклоненными прямолинейными створками. Это обобщение было выполнено известным румынским механиком *Каюсом Якобом* (1912–1992)<sup>2</sup> и приведено в его монографии по гидромеханике [7].

Развитие теории струйных течений газа на основе метода Чаплыгина–Фальковича, помимо работ К. Якоба [7, 8], отражено в статьях его учеников и последователей [9].

Дальнейшие разработки плоских задач теории дозвуковых газовых струй методом Чаплыгина–Фальковича в течение ряда лет проводились на кафедре аэрогидромеханики Саратовского университета С.В. Фальковичем, Ю.В. Сунгурцевым, Ю.В. Морковкиным, О.М. Сапунковой. Последним автором совместно с С.В. Фальковичем и под его руководством были разработаны и опубликованы решения задач о плоских струйных МГД-течениях, которые в то время впервые начали изучаться в нашей стране и за рубежом.

Подробно история возникновения и развития теории потенциальных газовых струй при дозвуковых скоростях и описание применения метода Чаплыгина–Фальковича приведены в монографии Ю.В. Сунгурцева [9].

### Дальнейшее развитие теории потенциальных газовых струй

Разработка теории плоских потенциальных газоструйных течений с дозвуковыми скоростями на кафедре гидроаэромеханики СГУ проводилась по следующим *основным научным направлениям*:

– поиск точных решений задач методом Чаплыгина–Фальковича, включая его различные модификации;

<sup>2</sup> *Якоб Каюс* – выдающийся математик и механик. Член Академии наук СРР (1963). Окончил Бухарестский ун-т (1931). Работал в Сорбонне (Париж, 1931–1935) и ряде ун-тов Румынии. Профессор Бухарестского ун-та (1950). Автор монографии [7].

– нахождение решений задач приближенными методами, применение численных приемов решения и табулирование газодинамических функций;

– решения задач о плоских струйных МГД- (магнито-газодинамических) течениях.

Как было упомянуто [10], публикация работы С.В. Фальковича [4] открыла новые возможности для исследования свойств плоских стационарных потенциальных течений газа с дозвуковыми скоростями.

Для **первого научного направления** характерно совместное исследование С.В. Фальковича и Ю.В. Сунгурцева<sup>3</sup>. В 1973 г. была опубликована статья [12], в которой рассмотрена задача о симметричном обтекании клина струей газа с дозвуковой скоростью.

К этому же направлению исследования относятся и пять статей Ю.В. Сунгурцева [13–17] по газовым струям, опубликованных в период с 1973 по 1982 гг.

**Второе научное направление** представлено

работами С.В. Фальковича (на фото) и Ю.В. Сунгурцева [18–20]. В диссертации Ю.В. Сунгурцева [11] приведены таблицы числовых значений функции Чаплыгина и её производной, а также значений функции Черри. Более подробные таблицы значений этих функций были опубликованы в 1974 г. отдельным депонированным изданием [18].

Следует отметить, что публикация подобного рода таблиц значений функций явилось новаторским шагом, позволившим шире применять численные методы, используемые при решении газоструйных задач методом Чаплыгина–Фальковича. До этого авторам подобных исследований приходилось табулировать функции Чаплыгина и Черри для каждого отдельного случая и каждой конкретной рассматриваемой ими задачи, как правило, в узком диапазоне числовых значений.

Упомянутые работы Ю.В. Сунгурцева по теории газовых струй объединены общей концепцией в его монографии [9]. В ней изложены методы исследования струйных тече-

ний газа с применением аналитических и численных методов. Их описание, по замыслу автора монографии, дано с позиции, акцентированной на прикладные проблемы.

**Третье научное направление** представ-



лено работами профессора С.В. Фальковича и доцента кафедры аэрогидромеханики СГУ О.М. Сапунковой<sup>4</sup> (см. фото) (1937–2000). Ее работы по теории струйных течений газа относятся к области магнитной газовой динамики (МГД).

МГД-динамика – наука о законах движения *электропроводящих газов* в магнитных (электромагнитных) полях. Это – раздел физики, возникший и развившийся "на стыке" классических наук – гидро- и электродинамики. Характерным и типичным МГД-объектом является *плазма*.

Актуальность исследований в области МГД во многом обусловлена ее техническими применениями, к которым относятся, в частности, МГД-генераторы электроэнергии, средства управления термоядерными реакциями и ускорителями ядерных частиц, плазменные двигатели космических аппаратов, плазмотроны химического синтеза и ряд других применений.

Математические свойства уравнений теории МГД-течений электропроводного газа изучены недостаточно; что явилось побудительным мотивом для начала исследований в этой области на кафедре аэрогидромеханики Саратовского университета, начиная с 1969 г.

В 1969 г. публикуется работа [21], в которой рассматриваются плоские стационарные адиабатические течения идеальной плазмы в стационарном магнитном поле, силовые линии которого совпадают с линиями тока. Уравнения таких движений представлены в плоскости годографа скорости в форме, аналогичной форме уравнений Чаплыгина [1]. Исследованы свойства решений краевых задач: экстремальные свойства и свойство единственности. В статье также найдены частные решения уравнений движения, определенные

<sup>3</sup> Сунгурцев Юрий Васильевич. Выпускник СГУ (1968). Аспирант СГУ (1972–1975). Канд. ф.-м. наук (1976). Доцент (1980). Автор монографии [9], диссертации [11] и более 22 научных работ по теории плоских потенциальных газовых струй.

<sup>4</sup> Сапункова Ольга Михайловна. Выпускница СГУ (1960). Аспирант СГУ (1960–1963). Канд. ф.-м. наук (1966). Доцент (1970). Автор более 40 научных работ по газовой динамике, из них 11 – по МГД – струйным течениям газа.

в плоскости годографа скорости.

Статья [21] имела определяющее значение для проводимых в дальнейшем исследований в данном научном направлении: все последующие публикации основаны на положениях и выводах этой работы. Одной из них является статья [22] 1971 года, в которой решается вопрос о применении метода Чаплыгина к исследованию задач МГД-струйного течения на примерах решения двух задач.

В 1978 г. публикуется работа [23], содержащая решение задачи обтекания тонкого клиновидного профиля в струе, набегающей на профиль с гиперкритической скоростью. В этом же году выходит из печати статья [24], в которой даны асимптотические формулы, представляющие приближения решений МГД-уравнений задачи обтекания тонкого клиновидного профиля струей плазмы.

В статье [25], опубликованной в 1979 г., приводится решение задачи об истечении МГД-струи из щели; это решение обобщает полученные ранее результаты для струй идеального газа на случай МГД-течения.

Струйные задачи МГД-теории, решенные ранее, относились к задачам с одной характерной скоростью. В работе [26], опубликованной в 1983 г., приведен пример решения струйной задачи с двумя заданными характерными скоростями; этот пример открывает новые возможности для постановки и решения задач струйной МГД-теории.

В 1970–80-е гг. XX в. актуальным являлся вопрос о влиянии стационарного магнитного поля на формирование формы границ плоского струйного МГД-течения и об оценке влияния на него фактора полевого воздействия. В связи с этим в 1984 г. появляется статья [27], содержащая эту оценку для струйного течения идеальной плазмы. Задачи о соударении газовых струй, решенные ранее для потенциального плоского течения идеального газа, в работе [28], опубликованной в 1985 г., распространяются на случай МГД-течения путем оценки влияния стационарного магнитного поля на основные характеристики струйного течения.

Анализ свойств и функций основных параметров струйного течения идеальной плазмы приведен в статье [29], опубликованной в 1987 г. Показано влияние фактора стационарного магнитного поля на характеристики струйного течения и его основные параметры. Расчет параметров МГД-струйных

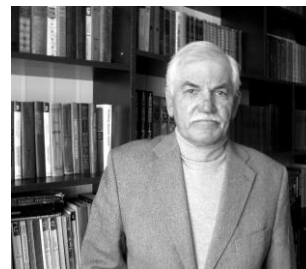
течений газа и оценка влияния стационарного магнитного поля на характеристики критической струи даны в работах [30, 31], опубликованных в 1988 и 1997 гг., соответственно.

В статье [32], относящейся к 1999 г., приводится пример струйного МГД-течения с двумя заданными характерными скоростями.

Публикация цикла приведенных выше работ, опубликованных О.М. Сапунковой за тридцатилетний период (с 1969 по 1999 гг.) привносит весомый вклад в теорию МГД-струйных течений и в ее приложения.

### Расширение теории Чаплыгина о газовых струях

Наряду с приемом С.В. Фальковича [4], позволяющим распространить теорию Чаплыгина на газоструйные задачи с несколькими характерными скоростями, для этой цели существуют и другие аналитические приемы. Одним из них является прием,



согласно которому решение газоструйной задачи представляется в аналитически замкнутой форме в виде контурного интеграла типа Барнса, определенного во всей области течения газа на плоскости годографа скорости. Вычисление этого интеграла приводит к представлению решения задачи в виде рядов, каждый из которых определен в соответствующей области течения в плоскости годографа скорости.

Данный прием был применен в 1979 и 1981 гг. Ю.В. Морковкиным<sup>5</sup> в его работах [33, 34], выполненных совместно с С.В. Фальковичем, а также в его диссертации [35]. В этих работах рассмотрены задачи о струйном обтекании клина и решетки плоских пластин дозвуковым потоком газа, в которых для ускорения сходимости рядов применялся *эпсилон-алгоритм Винна*.

Прием, связанный с применением контурных интегралов в задачах о дозвуковых газовых струях, использовался также Ю.В. Сунгурцевым. В статье, опубликованной в 1976 г. [15], с применением метода А. Макки [5, 6] решены две задачи о газоструйных течениях, в каждой из кото-

<sup>5</sup> Морковкин Юрий Вячеславович. Выпускник СГУ (1968). Аспирант СГУ (1976–1979). Кандидат ф.-м. наук (1984). Доц. (1987). Автор диссертации [35].

рых задана одна характерная скорость.

В его работе 1982 г. [17] произведено обобщение метода А. Макки на случай струйных течений газа с несколькими характерными скоростями, показанное на примере решения задачи о газоструйном обтекании решетки симметричных клиньев – задачи с двумя характерными скоростями.

Следует отметить, что исследования по газоструйным течениям с применением аппарата контурного интегрирования на кафедре аэрогидромеханики СГУ были инициированы профессором С.В. Фальковичем, который лично принимал в них непосредственное участие как соавтор работ и как консультант.

### Исследования по струйным течениям несжимаемой жидкости

Вместе с исследованиями по теории дозвуковых струйных течений газа на кафедре аэрогидромеханики СГУ проводились разработки теории струй неидеальной жидкости. Такой параллелизм в направлениях изысканий обусловлен ее изначально определенной исследовательской направленностью, заложенной при ее создании как кафедры *аэро- и гидро-*механики, сохранившейся впоследствии до конца ее существования. Заведующий кафедрой и глава ее научной школы профессор С.В. Фалькович руководил, консультировал и непосредственно участвовал в работах каждого из упомянутых направлений.

По теории струйных течений несжимаемой жидкости был выполнен обширный цикл работ, характеристика которых в целом может являться предметом отдельного рассмотрения. Ниже в качестве примера упоминаются лишь некоторые наиболее типичные работы данного направления.

Группа авторов, среди которых были С.В. Фалькович, Я.Г. Сапунков, В.И. Коробко, В.К. Шашмин, в период с 1969 по 1976 гг. (и в последующие годы) опубликовала ряд приоритетных работ актуальной прикладной направленности. К этим работам относятся, в частности, статьи С.В. Фальковича и В.И. Коробко, которые исследовали аэродинамические характеристики и теплообмен закрученной струи жидкости, текущей в безграничном пространстве, затопленном той же жидкостью [36]. Ими же рассмотрены неавтономные задачи теории струйных течений жидкости [39]. Помимо этого, ими были исследованы свойства плоских ламинарных струй, текущих

на пористой плоскости и на гладкой криволинейной непроницаемой поверхности [37]. Я.Г. Сапунковым в 1972 г. был изучен характер распространения затопленной струи вязкой неньютоновской степенной жидкости по непроницаемой плоскости [38].

В 1973 и 1974 гг. В.И. Коробко и В.К. Шашминым было проведено исследование свойства развития ламинарной струи жидкости, распространяющейся в спутном потоке той же жидкости и на непроницаемой поверхности [40, 41], а в 1975 и 1976 гг. ими же изучены свойства распространения турбулентной струи в спутном потоке и на гладкой непроницаемой поверхности [42–44].

### Другие исследования по теории газовых струй

Метод Чаплыгина–Фальковича решения задач теории газовых струй применим исключительно к плоским потенциальным (безвихревым) течениям газа. Попытка решения задачи о плоском стационарном вихревой струйном течении газа на основе метода Л.И. Седова–С. Бергмана была предпринята в 1966 г. в совместной работе *Н.Н. Макеева* и *В.М. Фомина*<sup>6</sup> [45]. В этой работе рассмотрена задача об обтекании под нулевым углом атаки равнобокого клина плоской вихревой дозвуковой струей газа со свободными границами. На примере этой задачи показано применение указанного метода; получено точное решение, а также найдена величина давления струи на контур клина.

К другому виду задач о газовых струях относится задача [46] об истечении плоской гиперзвуковой струи идеального газа, вытекающей из канала с параллельными стенками в однородную покоящуюся газовую среду с пониженным давлением. В ней рассмотрена схема взаимодействия плоских простых волн, построенная на основе теории Римана, реализующаяся при истечении гиперзвуковой струи политропического газа при перерасширении.

### Слово об Учителе

С.В. Фалькович – основатель кафедры аэрогидромеханики Саратовского университета, создатель одной из лучших в стране

<sup>6</sup> *Фомин Василий Михайлович*. Выпускник Казанского ун-та (1963); аспирант (1963–1966). Доктор ф.-м. наук (1982), проф. (1987). Академик РАН (2006). Директор ИТПМ СО РАН (1990). Главный ученый секретарь СО РАН (1996). Заместитель председателя СО РАН (2008).

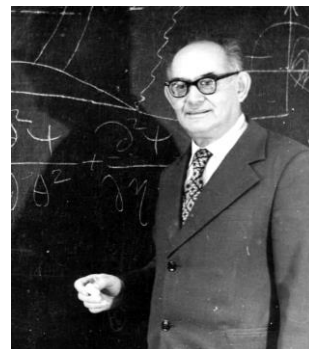
научной лаборатории аэродинамики.

Он – основатель научной школы газовой динамики СГУ, имевшей высокий научный потенциал, которая внесла весомый вклад в отечественную и мировую науку, в развитие промышленности и укрепление обороноспособности страны. Выпускники кафедры были широко востребованы в СССР: они работали в ведущих НИИ и КБ, являлись руководителями факультетов и кафедр, преподавателями вузов, научными сотрудниками и инженерами-исследователями. Представители научной школы газовой динамики СГУ явились носителями ее передовых научных традиций, заложенных ее основателем и руководителем. Все это – плоды неустанных плодотворных трудов Савелия Владимировича, созданные им прочно и на долгие годы.

Личность Учителя, его талант и эрудиция – это то, что определяет основную линию жизни учеников. Учитель – это не профессия, а образ и стиль жизни; он реально обладает максимумом авторитета и минимумом власти. Он внимателен и доброжелателен к своим ученикам, готов помочь им и поддержать их в трудную минуту. Будучи студентом старших курсов, пользовался консультациями и советами Савелия Владимировича, неоднократно обсуждал с ним ход выполнения моей инициативной научной работы и подготовки статьи по ней. И каждый раз, уходя от него, чувствовал необыкновенно высокий душевный подъем, прилив сил; ощущение, казалось бы, неограниченных возможностей. Это стимулировало активность работы, поиск новых научных задач, обостряло интерес и тягу к новым научным проблемам. Такое яркое незабываемое впечатление осталось на всю жизнь как счастливое время учебы и творчества. Вспоминаю об этом в трудные периоды жизни, и это является моральной поддержкой. Как было сказано: "Учитель прикасается к вечности: никто не может сказать, где оканчивается его влияние" (Г. Адамс).

Таков был мой учитель – Савелий Владимирович Фалькович. Такие учителя не забываются, о них помнят всю жизнь. Они живут в своих учениках, в учениках своих учеников и потому бессмертны. То лучшее, что передано нам Учителем – это не только знания и творческие навыки, но и воспитывающее начало, та внутренняя одухотворенность, тот идейный стержень, та прочная основа личности, которая помогает преодолевать

жизненные трудности, успешно достигать поставленной цели. Это то, что делает ученика достойным своего Учителя. Память об учителе сохраняется в его учениках, продолжателях его дела, в его достижениях, в истории науки. Он оставил после себя не только научные труды, но и светлую благодарную память в своих учениках.



*Автор благодарит за содействие в подготовке статьи профессора СГУ А.С. Фальковича, старшего научного сотрудника ИПТМУ РАН Я.Г. Сапункова (Саратов), Ю.В. Сунгурцева (Республика Беларусь, г. Новополоцк), Ю.В. Морковкина (Саратовская область, г. Энгельс) и всех, чей труд способствовал улучшению структуры и содержания статьи.*

### Список литературы

1. Чаплыгин С.А. О газовых струях. М.; Л.: Гостехиздат, 1949. 144 с.
2. Мецкерский И.В. Динамика точки переменной массы // СПб.: Типография Императорской Академии наук, 1897. 160 с. / Магистерская диссертация. СПб.: Императорский ун-т, 1897.
3. Мецкерский И.В. Работы по механике тел переменной массы. Серия: Классики естествознания. М.: ГИТТЛ, 1952. С. 37–188.
4. Фалькович С.В. К теории газовых струй // Прикладная математика и механика. 1957. Т. 21, вып. 4. С. 459–464.
5. Mackie A.G. The solution of boundary value problems for a general hodograph equation // Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. Mathematics and Physics Science. 1958. Vol. 54, № 4. P. 538–553.
6. Mackie A.G. Applications of the theory of the general hodograph equation // Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. Mathematics and Physics Sciences. 1962. Vol. 58, № 4. P. 631–645.
7. Iacob C. Introduction Mathematique a la Mecanique des fluids. Bucarest-Paris: Verlag Academia-Gauthier-Villars. 1959.

8. *Iacob C.* Sur quelques solutions exactes de la dynamique des gaz // *Archiwum Mechaniki Stosowanej*. 1962. Т. 14, № ¾. Р. 603–619.
9. *Сунгурцев Ю.В.* Плоские струйные течения газа. М.: Изд-во Московского ун-та, 1989. 256 с.
10. *Макеев Н.Н.* Из истории создания теории струйных течений газа (к 60-летию начала исследований по теории газовых струй в Саратовском университете). 1 // *Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика*. 2019. Вып. 1 (44). С. 74–82.
11. *Сунгурцев Ю.В.* Некоторые задачи дозвуковых струйных течений газа: дис. ... канд. физ.-матем. наук. Саратовский гос. ун-т. Саратов, 1975. 219 с.
12. *Сунгурцев Ю.В., Фалькович С.В.* Дозвуковое струйное обтекание клина // *Аэродинамика: межвуз. науч. сб.* Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1973. Вып. 2 (5). С. 3–11.
13. *Сунгурцев Ю.В.* К вопросу об истечении газа из щели между двумя плоскостями // *Аэродинамика: межвуз. науч. сб.* Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1973. Вып. 2 (5). С. 91–100.
14. *Сунгурцев Ю.В.* О кривизне границы критической струи // *Аэродинамика: межвуз. науч. сб.* Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1974. Вып. 3 (6). С. 39–46.
15. *Сунгурцев Ю.В.* О двух несимметричных струйных задачах с одной характерной скоростью // *Аэродинамика: межвуз. науч. сб.* Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1976. Вып. 5 (8). С. 33–44.
16. *Сунгурцев Ю.В.* Исследование эффекта конечности ширины струи при дозвуковом симметричном обтекании клина // *Аэродинамика: межвуз. сб. науч. тр.* Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. Вып. 8 (11). 1981. С. 69–76.
17. *Сунгурцев Ю.В.* Интегральная аналогия метода Чаплыгина–Фальковича в задачах о газовых струях // *Revue Roumaine de Mathematiques Pures et Appliquees*. 1982. Т. 27, № 4. Р. 499–509 (на рус. яз.).
18. *Сунгурцев Ю.В., Фалькович С.В.* Таблицы функций Чаплыгина / Саратов. гос. ун-т. Саратов, 1974. Деп. в ВИНТИ 19.09.1974. Д-2489-74. 51 с.
19. *Сунгурцев Ю.В.* Приближенный метод решения задач о газовых струях при  $M \leq 1$  // *Аэродинамика: межвуз. сб.* Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1972. Вып. 1 (4). С. 100–104.
20. *Сунгурцев Ю.В.* Суммирование рядов в задачах о газовых струях // *Аэродинамика: межвуз. науч. сб.* Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1975. Вып. 4 (7). С. 55–64.
21. *Фалькович С.В., Сапункова О.М.* Уравнения типа Чаплыгина в магнитной газодинамике // *Известия ВУЗ. Сер.: Математика*. 1969, № 6 (85). С. 88–97.
22. *Сапункова О.М.* О применении метода Чаплыгина к решению некоторых задач магнитной газодинамики // *Трансзвуковые течения газа: межвуз. науч. сб.* Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1971. Вып. 3. С. 19–24.
23. *Сапункова О.М., Сапунков Я.Г.* Тонкий клин в гиперкритической струе // *Аэродинамика: межвуз. науч. сб.* Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1978. Вып. 6 (9). С. 121–131.
24. *Сапункова О.М.* Асимптотические разложения решений МГД-уравнений и задача о тонком клине в струе плазмы // *Аэродинамика: межвуз. науч. сб.* Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1978. Вып. 6 (9). С. 111–120.
25. *Сапункова О.М.* Истечение МГД-струи из щели // *Аэродинамика: межвуз. науч. сб.* Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1979. Вып. 7 (10). С. 122–129.
26. *Сапункова О.М.* Струйные задачи с двумя характерными скоростями в магнитной газодинамике // *Аэродинамика: межвуз. науч. сб.* Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1983. Вып. 9 (12). С. 78–90.
27. *Сапункова О.М.* Расчет влияния магнитного поля на форму струи идеальной плазмы // *Вычислительные методы и программирование: межвуз. науч. сб.* Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1984. Вып. 5. С. 24–28.
28. *Сапункова О.М.* Учет влияния магнитного поля при соударении струй // *Вычислительные методы и программирование: межвуз. науч. сб.* Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1985. Вып. 6. С. 65–70.
29. *Сапункова О.М.* О струйных течениях идеальной плазмы // *Аэродинамика: межвуз. науч. сб.* Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1987. Вып. 10 (13). С. 57–64.
30. *Сапункова О.М.* К расчету струйных течений в магнитной газодинамике // *Математика и ее приложения: межвуз. науч. сб.* Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1988. С. 71–72.
31. *Сапункова О.М.* Влияние магнитного поля на характеристики критической струи // *Аэродинамика: межвуз. науч. сб.* Саратов:

- Изд-во Саратов. ун-та. 1997. Вып. 14 (17). С. 103–108.
32. Сапункова О.М. Пример МГД-течения с двумя характерными скоростями // Математика. Механика. Математическая кибернетика: межвуз. науч. сб. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1999. С. 99–100.
  33. Морковкин Ю.В., Фалькович С.В. Применение контурных интегралов в методе годографа для струйных течений газа // Аэродинамика: межвуз. науч. сб. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1979. Вып. 7 (10). С. 18–31.
  34. Морковкин Ю.В., Фалькович С.В. Струйное обтекание решётки пластин дозвуковым потоком газа // Аэродинамика: межвуз. науч. сб. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1981. Вып. 8 (11). С. 33–42.
  35. Морковкин Ю.В. Исследование течений газа при больших дозвуковых и трансзвуковых скоростях методом контурного интегрирования: дис. ... канд. физ.-матем. наук. Ленинград. гос. ун-т. Л., 1983. 132 с. 80 наимен. лит.
  36. Фалькович С.В., Коробко В.И. Аэродинамика и теплообмен закрученной струи, распространяющейся в безграничном пространстве, затопленном той же жидкостью // Известия ВУЗ. Математика. 1969, № 7. С. 87–95.
  37. Коробко В.И., Фалькович С.В. Развитие плоских ламинарных струй на пористой плоскости и криволинейной поверхности // Аэродинамика: межвуз. сб. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1972. Вып. 1(4). С. 109–127.
  38. Сапунков Я.Г. Распространение затопленной струи степенной жидкости вдоль твердой плоской поверхности // Аэродинамика: межвуз. сб. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1972. Вып. 1 (4). С. 104–108.
  39. Коробко В.И., Фалькович С.В. Некоторые неавтономные задачи теории струйных течений // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1970. № 2.
  40. Коробко В.И. Развитие ламинарной закрученной струи в спутном потоке той же жидкости // Аэродинамика: межвуз. науч. сб. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1973. Вып. 2 (5). С. 80–90.
  41. Коробко В.И., Шашмин В.К. Развитие веерной ламинарной струи на непроницаемой и пористой сферической поверхности // Аэродинамика: межвуз. науч. сб. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1974. Вып. 3 (6). С. 104–109.
  42. Коробко В.И., Шашмин В.К. Веерная турбулентная струя на сферической поверхности // Аэродинамика: межвуз. науч. сб. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1975. Вып. 4 (7). С. 69–75.
  43. Зейгман И.Я., Коробко В.И., Шашмин В.К. Закрученная турбулентная струя в спутном потоке // Аэродинамика: межвуз. науч. сб. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1975. Вып. 4 (7). С. 46–84.
  44. Шашмин В.К. Развитие веерной турбулентной струи на гладкой поверхности // Аэродинамика: межвуз. науч. сб. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1976. Вып. 5 (8). С. 44–51.
  45. Макеев Н.Н., Фомин В.М. К теории вихревых струйных течений газа // Сб. аспирантских работ. Математика. Механика. Физика. Бионика. Казань: Изд-во Казан. ун-та. 1966. С. 88–93.
  46. Макеев Н.Н. К теории взаимодействия простых волн // Инженерный журнал. М.: Изд-во АН СССР. 1965. Т. 5, вып. 4. С. 756–761.

## From the history of the theory of jet gas flows. 2 (on the 60<sup>th</sup> anniversary of the beginning of studies on the theory of gas jets at Saratov University)

**N. N. Makeyev**

Problems of Precision Mechanics and Control Institute Russian Academy of Sciences  
24, Rabochaya st., Saratov, 410028, Russia  
nmakeyev@mail.ru; (845) 272-35-33

Fragments of the history and development of scientific research on the dynamics of jet gas flows conducted at the Department of theoretical mechanics and aerohydrodynamics of Saratov state University in the period from 1957 to 1989 are presented.

**Keywords:** gas dynamics; theory of gas jet; history of mechanics; history of Saratov University.