

ЛАЗЕРНАЯ ДОПЛЕРОВСКАЯ АНЕМОМЕТРИЯ И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

В. С. СОБОЛЕВ

Все существовавшие (в долазерную эпоху) типы источников света представляли собой устройства, которые радиоинженеры обычно называют генераторами шума, и все тонкие и оригинальные методы оптических измерений имели дело, по существу, с использованием шума. Изобретение лазера сразу же опрокинуло этот барьер. Это позволяет надеяться, что в будущем мы сможем управлять электромагнитными полями, генерируемыми на оптических и более высоких частотах, с той же самой точностью и с тем же разнообразием методов, которые стали обычными в радиотехнике.

1964 г. - Р. Глаубер,
лауреат Нобелевской премии по физике 2005 г.



Вот уже более 100 лет важнейшей проблемой механики является турбулентное движение жидкостей и газов. Об актуальности решения этой задачи хорошо сказал известный автор Фейнмановских лекций по физике: «Однажды нам понадобится рассчитать поток воды, брызжущей из шланга, а мы это не умеем».

Особенности гидро- и аэродинамических течений состоят в том, что начиная с некоторой величины напора течение перестает быть спокойным, ламинарным, его скорость начинает сильно флуктуировать и флуктуировать случайным образом. Главный вопрос заключается в том, почему при постоянной разности давлений и детерминированных граничных условиях возникает хаос? Откуда он берется, что служит его причиной, и как это хаос зарождается?

С явлениями турбулентности коллектив нашей лаборатории впервые столкнулся в 1964 г., когда известный в СО АН адмирал, доктор наук, профессор Г. С. Мигиренко предложил создать прибор, который позволял бы исследовать это явление в жидкостных потоках. Через год прибор был готов. Его датчик представлял собой тонкую пленку из металла с большим коэффициентом температурного изменения проводимости. Поток воды, набегающий на нагретую пленку, сносит тепло, вследствие чего меняется сопротивление пленки. Будучи включенной в одно из плеч радиочастотного моста, она вызывает разбаланс, который ликвидирует схема автоматического регулирования. Сигнал на выходе этой схемы оказывается пропорциональным турбулентным флуктуациям скорости исследуемого потока. Прибор мы назвали РТПС-1-«Радиочастотный термоанемометр

постоянного сопротивления», так как схема терморегулирования удерживает постоянным сопротивление пленки. На первые испытания прибора был приглашен академик Г. И. Будкер, который с видимым интересом наблюдал, как при переходе от ламинарного к турбулентному режиму течения ровная линия на экране осциллографа, соответствующая мгновенной скорости потока, начинала вдруг изгибаться самым причудливым образом, причем частота и интенсивность флуктуаций менялись на глазах с увеличением средней скорости потока.

Так началось наше участие в решении проблем турбулентности. Далее произошли знаменательные события. В начале 1960-х гг. усилиями лауреатов Нобелевской премии А.М.Прохорова, Н.Г.Басова (СССР) и Ч.Х.Таунса (США) была показана возможность усиления СВЧ-колебаний пучком возбужденных молекул, и на этой основе создан источник когерентного оптического излучения - лазер. В 1964 г. известные спектроскописты Камминс и Йе (США) показали, что лазерное излучение, рассеянное случайным ансамблем взвешенных в потоке частиц, сохраняет частичную когерентность и несет информацию об их скорости в виде доплеровского смещения частоты.

Поскольку мы уже занялись проблемами измерений характеристик турбулентности и понимали, что наш пленочный датчик вносит искажения в исследуемый поток, то с энтузиазмом взялись за использование оптического эффекта Доплера в гидроаэродинамическом эксперименте, обещающем получение значительной мгновенной скорости потока без его возмущений.

Работы начались совместно с лабораторией В.П. Коронкевича. В 1967 г. был куплен первый

в ИАиЭ He-Ne (гелий-неоновый) лазер, и уже в 1969 г. журнал "Автометрия" опубликовал результаты наших экспериментальных исследований первого в СССР лазерного доплеровского измерителя скорости потоков жидкостей (ЛДИС).

Следует отметить, что ЛДИС представляет собой довольно сложный оптикоэлектронный комплекс, состоящий из лазера, формирующей оптики и нетривиальной электроники, выдающей информацию о скорости. Оптическая часть прибора создает зондирующие пучки, которые направляются в исследуемую точку потока. Рассеянный взвешенными в потоке микрочастицами свет собирается приемным объективом и подается на катод фотодетектора. Вследствие эффекта Доплера рассеянное излучение от каждого из зондирующих пучков приобретает смещение частоты, определяемое следующим соотношением $\omega_D = \vec{v}(\vec{k}_s - \vec{k}_i)$, где \vec{k}_s, \vec{k}_i - волновые вектора рассеянного и зондирующего пучков соответственно. Эти рассеянные пучки интерферируют между собой, в результате чего на выходе фотоприемника возникает электрический сигнал, частота которого пропорциональна проекции скорости на направление разностного волнового вектора зондирующих пучков. Полученный сигнал по своей природе - процесс случайный и сопровождается достаточно интенсивными шумами. С учетом этого система его электронной обработки включает в себя узлы следящей фильтрации и оптимальной демодуляции.

Отметим, что эта сложность окупается такими неоченимыми, с точки зрения специалистов в области гидро- и аэродинамики, возможностями, как полное отсутствие возмущений ис-

следуемого потока. Введение дополнительных зондирующих лучей позволяет получать информацию обо всех трех компонентах вектора скорости при высоком быстродействии. И ко всем этим преимуществам добавляется еще достаточно высокая точность измерений. Так, например, при времени осреднения 10 мс погрешность измерений может составлять всего 0,1 %.

Наши специалисты методами Фурье-оптики проанализировали основные оптические схемы ЛДИС и получили математические модели доплеровского сигнала. На основании этих результатов стало возможным рассчитать и построить оптическую схему ЛДИС, удовлетворяющую всем специфическим требованиям гидроаэродинамического эксперимента. Исследования электрического доплеровского сигнала позволили установить фундаментальное соотношение неопределенности между желаемой точностью измерений и пространственным разрешением: чем выше желаемая точность, тем худшим будет пространственное разрешение. На основании анализа статистических характеристик получаемого сигнала определена потенциальная точность ЛДИС и построены алгоритмы оптимальных оценок скорости по критерию достижения максимума функции правдоподобия.

Уже в 1975 г. нами была издана монография, посвященная доплеровской анемометрии. Как выяснилось позже, она стала «первой ласточкой» в этой области не только в СССР, но и в мире. А через год в свет вышло сразу несколько книг по этой тематике.

Наши результаты вызвали интерес как в СССР, так и за рубежом. Государственный

оптический институт (Ленинград) предложил сотрудничество в области исследования турбулентности Мирового океана, а известная немецкая фирма «Карл Цейс Йена» - контракт на совместную разработку ЛДИС для научных исследований (рис. 1). В результате в 1980 г. на Международной Лейпцигской ярмарке был продемонстрирован универсальный лазерный доплеровский измеритель скорости ЛАДО-1 (рис. 2), который произвел сильное впечатление на Западе. Дело в том, что, в отличие от имеющихся на рынке полулабораторных образцов ЛДИС, он представлял собой рабочее место исследователя-гидродинамика со всеми компонентами необходимого сервиса. Вскоре появилась и его следующая двухкомпонентная модификация ЛАДО-2 (рис. 3).

Несмотря на определенные успехи, директор ИАиЭ академик Ю. Е. Нестерихин постоянно упрекал нас в том, что мы, по его выражению, «точим топор, но не рубим». По его инициативе в Институте была сформирована группа с заданием разобраться с основным неясным вопросом: как и каким образом зарождается турбулентность? Дело в том, что к этому времени (1976-1982 гг.) теоретические основы развитой турбулентности были уже построены, и именно проблема зарождения турбулентных флуктуаций оставалась «белым пятном». В группу были привлечены физики В. С. Львов и А. А. Предтеченский, а от наших двух лабораторий в работе принимали участие В. С. Соболев, В. П. Коронкевич, Ю. Н. Дубнищев, Ю. Г. Василенко, Е. Н. Уткин, Ф. А. Журавель, З. Б. Кругляк. В качестве объекта исследований было использовано течение Куэтта, которое образуется в зазоре между двумя цилиндрами, когда внутренний цилиндр вращается, а внешний находится в состоянии покоя. Тонкости эксперимента требовали совершенной геометрии цилиндров, отсутствия биений, сверхточного поддержания скорости вращения внутреннего цилиндра. Усилиями выдающегося конструктора ИАиЭ СО РАН С. А. Кузнецова стенд был спроектирован и при активном участии начальника мастерских И. Г. Митюхина (хоть и

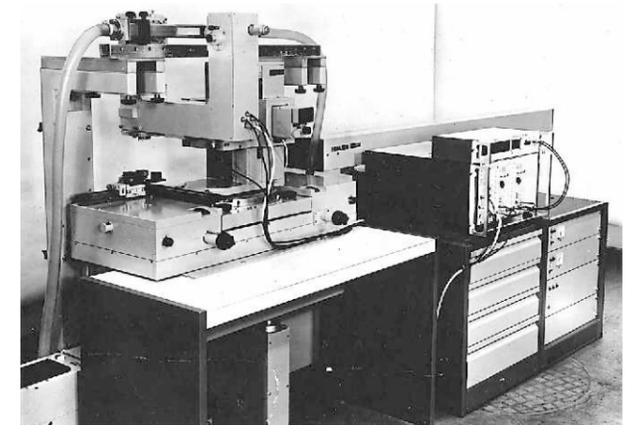


Рис. 2. Лазерный доплеровский анемометр ЛАДО-1.

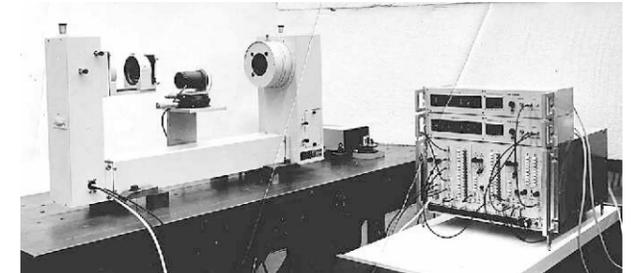


Рис. 3. Лазерный доплеровский анемометр ЛАДО-2.

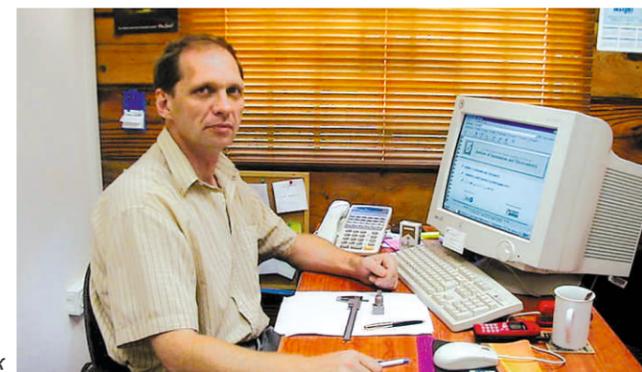
не без труда) изготовлен (рис. 4). Началась его наладка совместно с ЛДИС. В отличие от американских ученых, которые также были заняты аналогичными исследованиями, мы пустили пучки вдоль цилиндров, увеличив зазор между ними и тем самым расширив зону перехода к турбулентности по диапазону скоростей, что позволило, как выяснилось позже, более детально исследовать процесс ее зарождения.

Выходной сигнал ЛДИС через АЦП и интерфейс был введен в память ЭВМ «Минск-32». Таким образом, открылась возможность осуществить статистические исследования флуктуаций скорости потока между цилиндрами.

В этот период существовали две гипотезы возникновения турбулентности. Первая принадлежала Л. Д. Ландау и заключалась в том, что турбулентность возникает как бесконечная цепочка бифуркаций мод течения с несоизмеримыми частотами колебаний. Хотя при такой



Рис. 1. Группа немецких специалистов известной фирмы «Карл Цейс Йена» и сотрудников ИАиЭ СО РАН в Академгородке после обсуждения проекта создания коммерческого ЛДИС (1977 г.). Слева направо: Ф. Бауман, В.П. Коронкевич, Н. Файстауэр, В.С. Соболев, В. Криг, А.И. Жилевский.



С. Н. Лукацук



В. С. Львов

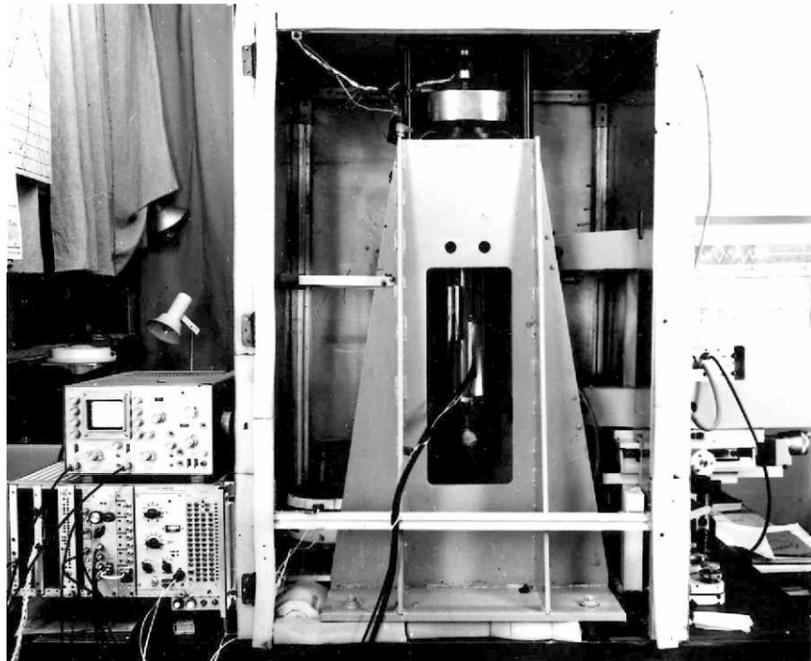


Рис. 4. Установка для проведения экспериментальных исследований течения Кузнетта.

ситуации функция корреляции не должна идти к нулю с ростом задержки, тем не менее возврат к максимуму должен происходить через очень большие задержки по времени. И такая гипотеза казалась вполне правдоподобной. Вторая, более поздняя гипотеза, связана с явлениями так называемого «странного аттрактора», т. е. такого фазового портрета движения, когда несколько возбужденных мод образуют в фазовом пространстве подобие многомерного случайного тора.

Вначале мы исследовали эволюцию спектральных плотностей флуктуаций скорости в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Оказалось, что с ростом этого числа сначала возникает одна колебательная мода и ее гармоники. Затем возникает новая колебательная мода на не соизмеримой с первой частоте и ее гармоники (рис. 5). После

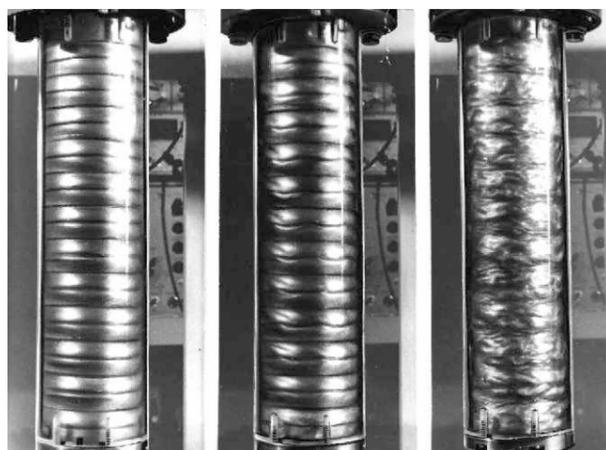


Рис. 5. Течение Кузнетта: а - вихри Тэйлора, первая колебательная мода, б - переход к турбулентному течению.

нескольких таких бифуркаций спектральные линии мод начинают уширяться, образуя сплошной спектр (рис. 6). Это был самый важный момент. Теперь нужно было выяснить причины и природу этого уширения. Путем совместного анализа амплитуд мы выяснили, что они антикоррелируют. Иными словами, если энергия одной моды растет, то амплитуды других падают (рис. 7). Эти переходы энергии возникают в тот момент, когда условия существования каждой моды равновероятны и между ними возникает конкуренция. В результате был сделан вывод о том, что турбулентность сначала развивается в соответствии с гипотезой Ландау, но затем (вследствие конкуренции мод) происходит уширение их спектральных линий, и спектр флуктуаций становится сплошным, что характерно для развитой турбулентности. Таким образом, с помощью ЛДИС была решена фундаментальная задача - выявлен механизм зарождения гидродинамической турбулентности. Следует отметить, что американцы не смогли детально исследовать все стадии перехода к турбулентности, поскольку зазор между цилиндрами в их эксперименте оказался слишком узким, и переход к турбулентности осуществляется «скачком».

Полученные в ИАиЭ СО РАН результаты были доложены на межинститутском семинаре (1980г.), на котором присутствовало большинство «турбулентщиков» СО РАН. Мнение семинара было единодушным - сделан важный шаг в решении проблемы зарождения гидродинамической турбулентности.

Хотя основные идеи лазерной доплеровской анемометрии хорошо разработаны и известны,

эта методика продолжает успешно развиваться (рис. 8, 9), о чем свидетельствуют многочисленные публикации и международные конференции, например, «Оптические методы исследования потоков», организуемые Московским энергетическим институтом и СО РАН с периодичностью один раз в два года уже на протяжении более 15 лет. Из новейших направлений развития ЛДИС можно отметить следующие:

- доплеровскую визуализацию и количественную оценку поля скоростей;
- методы обработки доплеровского сигнала, основанные на оценках мгновенной частоты и следящей фильтрации;
- алгоритмы высокоточной обработки доплеровского сигнала по критерию достижения максимума функции правдоподобия доплеровской частоты.

Особо следует упомянуть возможность использования оптической обратной связи при создании ЛДИС на основе полупроводниковых лазеров. Большое усиление этих лазеров позволяет разработать простые и малогабаритные ЛДИС, сверхчувствительные по отношению к рассеянному свету. Нельзя не отметить последние результаты применения созданного нами доплеровского анемометра при исследовании когерентных структур в струйных течениях, которые проводились в рамках Интеграционного проекта ИТПМ - ИАиЭ СО РАН в 2003-2005 гг. В частности, получена интересная информация о поведении струи под акустическим воздействием. Установлено, что интенсивность турбулентности на краях струи в этом случае существенно возрастает, сужаются спектральные линии колебательных движений струи и возникает субгармоника на половинной частоте возбуждения.

Анализ тенденций развития и применения

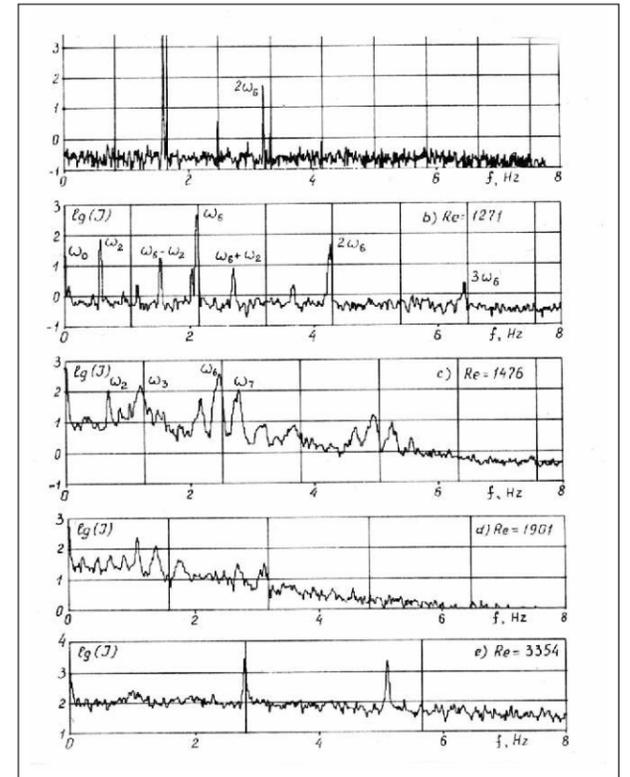


Рис. 6. Эволюция формы спектральных линий течения Кузнетта с ростом числа Рейнольдса.

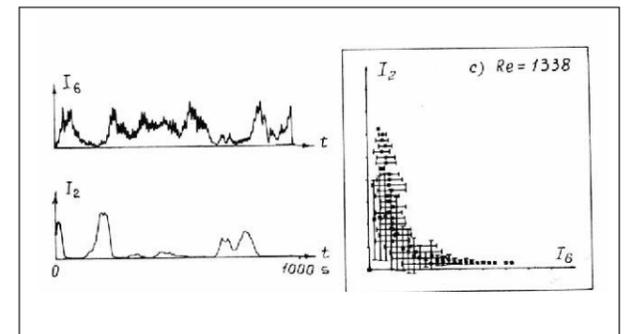


Рис. 7. Антикореляция амплитуд второй и шестой колебательных мод течения Кузнетта и область их регрессии.

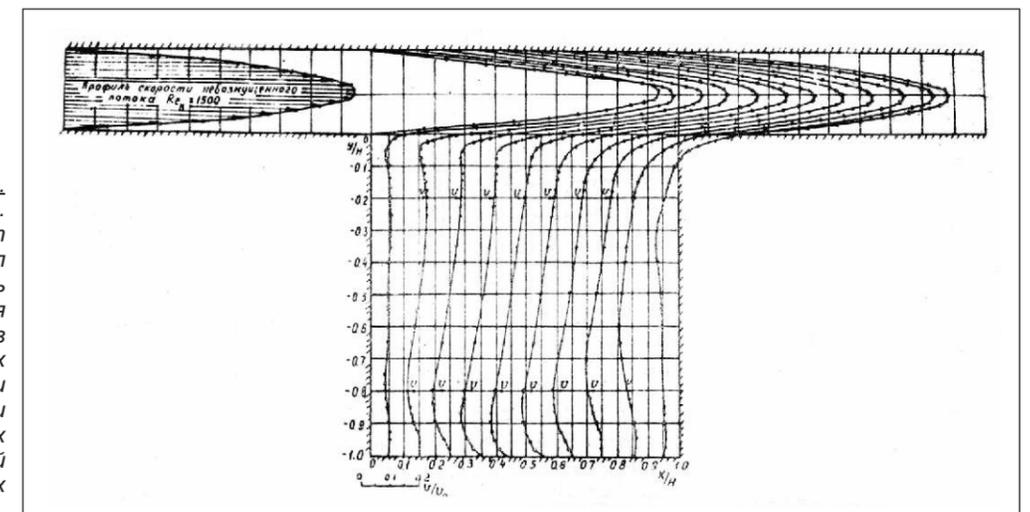


Рис. 8. Течение в траншее. Эксперимент показал недопустимость захоронения вредных отходов в глубоких впадинах океана, так как при наличии поверхностных течений происходит их вымывание.

лазерной доплеровской анемометрии показывает, что ее потенциал далеко не исчерпан. Использование эффектов оптической обратной связи, световолоконной техники, частотной модуляции и новых, например, авторегрессионных методов оценки доплеровской частоты, обещает упростить, удешевить и повысить точность ЛДИС.

Параллельно с решением задач фундаментальной и прикладной гидроаэродинамики область применений доплеровской анемометрии интенсивно расширяется в таких направлениях, как биофизика и медицина, диагностика энергетического оборудования и АСУТП. С ее помощью уже в настоящее время успешно оцениваются параметры кровообращения, проводится диагностика сахарного диабета и глазных заболеваний. В сочетании с бурно развивающейся лазерной томографией тканей человека доплеровская анемометрия позволяет получать количественную информацию о микроциркуляции крови в них.

В ближайших планах лаборатории - совместные работы по применению ЛДИС в области медицины со специалистами Института патологии кровообращения им. Е.Н. Мешалки-

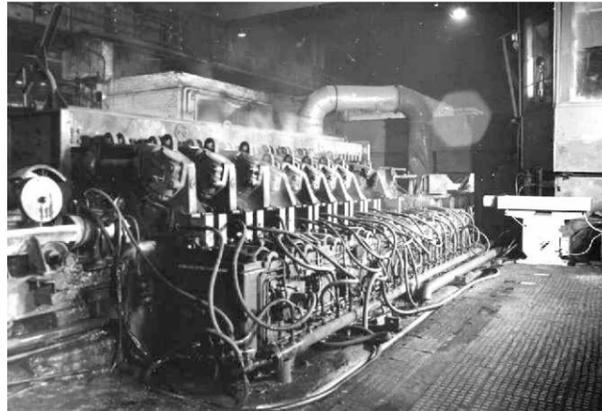


Рис. 9.
ЛДИС на редуционном стане в трубопрокатном цехе Новосибирского завода им. Кузьмина.

на. Еще одна перспективная область приложения доплеровских систем - это создание универсальных бесконтактных приборов вибродиагностики, светодальномеров на небольшие расстояния, что отвечает насущным требованиям быстро развивающейся робототехники, а также разработка интерферометрической аппаратуры для обеспечения безопасной работы агрегатов атомных электростанций.



А. И. Скурлатов



Г. А. Кащеева



А. А. Столповский



Е. Н. Уткин



А. М. Харин



Стоят (слева направо): А.И. Скурлатов, А.М. Щербаченко, С.В. Хабаров, О.А. Саморядов, А.М. Харин.
Сидят: Е.Н. Уткин, Г.А. Кащеева, В.С. Соболев, А.А. Столповский.



А. М. Щербаченко