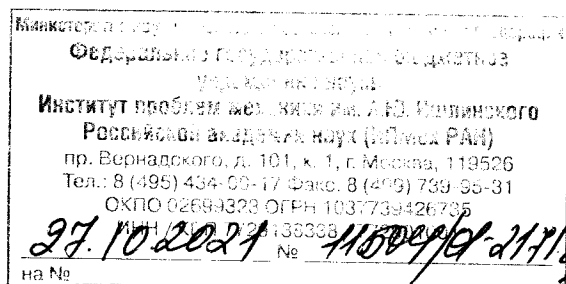


Утверждаю

Директор Института проблем механики

им. А. Ю. Ишлинского РАН



ф.-м.н.

Якуш

2021 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Маликова Александра Геннадьевича

**«Управление механикой структурно-фазового состава**

**высокопрочных лазерных сварных соединений**

**термически упрочняемых алюминиевых сплавов»,**

представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.9 (01.02.05) – «Механика жидкости газа и плазмы».

Диссертация в основной своей части посвящена исследованию воздействия лазерного излучения высокой интенсивности на конструкционные материалы при сварке листовых алюминиевых сплавов и выработке методов управления результатами такого воздействия с целью получения сварных соединений с нужными свойствами. Структура образуемого при этом сварного шва определяется сложными газо- и гидродинамическими явлениями, происходящими в многофазной среде канала лазерной сварки в условиях взаимодействия течений газообразной и жидкой компонент с окружающим твердым материалом. Таким образом, методы исследования, разработанные в диссертации, а также полученные в ней практические результаты, направлены на создание научных основ управления гидромеханикой взаимодействия лазерного излучения высокой интенсивности с веществом и позволяют определять параметры реального технологического процесса лазерной сварки авиационных алюминиевых сплавов для получения соединений с заданными характеристиками.

С этой точки зрения тематику диссертационной работы можно квалифицировать как соответствующую специальности 1.1.9 «Механика жидкости газа и плазмы» по областям исследования «Физико-химическая гидромеханика», «Гидромеханика сред, взаимодействующих с электромагнитным полем», «Экспериментальные методы исследования динамических процессов в жидкостях и газах».

Проведенные автором фундаментальные и прикладные исследования позволили ему достичь цели диссертационной работы по выработке научных основ технологии лазерной сварки термически упрочняемых алюминиевых и алюминиево-литиевых сплавов авиационного назначения. Практически автору удалось достичь максимальных статических механических характеристик сварных швов (временная прочность, предел текучести, относительное удлинение при разрыве) близких или равных характеристикам исходных сплавов. В ходе исследований и отработки технологии лазерной сварки автор особое внимание уделил установлению закономерностей изменения структуры, эволюции фазового состава материала после воздействия лазерного излучения и последующей термомеханической обработки.

### **Актуальность работы**

В практическом отношении диссертация Маликова А.Г. направлена на решение актуальной проблемы производства структурных элементов авиационной техники по замене технологии заклепочных соединений лазерной сваркой. В настоящее время для соединения алюминиевых сплавов при создании сложных и ответственных конструкций, интенсивно эксплуатируемых в условиях циклических термических и механических нагрузок, чаще всего используется технология заклепочных соединений. Вместе с высокой надежностью соединения эта технология отличается длительным производственным циклом и высокой долей ручного труда, повышенной материалоемкостью и массой соединений, а также необходимостью дополнительных мер по герметизации соединений. По оценкам ФГУП «ВИАМ» замена заклепочных соединений на сварные при соединении алюминиево-литиевых сплавов могла бы обеспечить снижение веса несущей конструкции летательного аппарата до 25 %.

Препятствием на этом пути является известная проблема механической прочности сварных соединений современных алюминиево-литиевых термически упрочняемых сплавов авиационного назначения – независимо от технологии сварки прочность образуемого соединения составляет от 50 до 80% прочности исходного сплава. Причины снижения прочности при сварке к моменту начала работ по диссертации однозначно установлены не были. Также не была проведена разработка и оптимизация режимов лазерной сварки рассматриваемых алюминиевых сплавов.

Лазерная сварка, как высокоскоростной и управляемый процесс, позволяет выполнять сварку деталей сложной формы с высокой скоростью и точным контролем параметров. Тем не менее, сложность и скорость процессов нагрева материала, его испарения, поглощения лазерного излучения в плазменно-паровом канале, теплопередачи, плавления, течения и последующего затвердевания расплава приводят к образованию различных фаз кристаллизации материала

вокруг сварного шва, в результате чего снижается его прочность. Фазовый состав зоны плавления сварного шва зависит от исходного фазового состава материала, соотношения концентрации основных легирующих элементов Mg, Cu, Li, а также от использования присадочного материала в процессе сварки. Кроме того, распределение упрочняющих фаз в твердом растворе и на границах сварного шва может отличаться от основного сплава. Наличие упрочняющих фаз в сварном шве вызывает изменение механических характеристик и приводит в первую очередь к снижению прочности. Влияние структурно фазового состава материала сварного шва на механические свойства лазерных сварных соединений до начала работ по диссертации не было установлено.

### **Общая характеристика работы**

В диссертационной работе Маликовым А.Г. решена комплексная научно-техническая проблема, связанная с достижением максимальных статических механических характеристик лазерных сварных соединений авиационных материалов, таких как термически упрочняемые алюминиевые и литий-алюминиевые сплавы. Задачу удалось решить путем управления структурой и фазовым составом сварного шва при лазерном воздействии, а также в ходе последующей термообработки в виде закалки и искусственного старения. В работе впервые применяется контроль изменения структурно-фазового состава сварного шва алюминиевых сплавов на всех стадиях обработки с помощью физических методов дифрактометрии синхротронного (рентгеновского) излучения, микроскопии высокого разрешения, в том числе электронной микроскопии, в сочетании с комплексной оценкой физико-механических, технологических и функциональных свойств получаемых соединений.

Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения.

Во **введении** определены основные направления работы, обсуждается актуальность и практическая ценность проведенных исследований, а также сформулированы защищаемые научные положения диссертации.

В **главе 1** рассмотрены основные принципы лазерной сварки алюминиевых сплавов и показана перспективность процесса лазерной сварки для решения задач диссертации. Сварка лазерным излучением высокой интенсивности – сложное термо-, газо- и гидродинамическое явление, включающее взаимодействие лазерного излучения с поверхностью и плазмой в парах материала внутри образуемого парогазового канала, тепло- и массообмен между газовой, жидкой и твердой фазами, фазовые переходы при затвердевании расплава в условиях быстрого охлаждения. Математическое моделирование такого сложного явления затруднено и не позволяет прогнозировать результаты сварки в отношении прочности образуемого соединения, что обуславливает важность проведения экспериментальных работ. Как показано в главе, алюминиевые сплавы толщиной

более 1 мм можно сваривать в режиме глубокого проплавления с образованием парогазового канала.

В главе 2 приведены характеристики используемых в авиастроении термически упрочняемых алюминиевых и алюминий-литиевых сплавов марок Д16Т, 1424, 1441, В-1461, В-1469. Описана методика проведения экспериментов по созданию лазерных сварных соединений, а также применяемое технологическое и аналитическое оборудование. Эксперименты по лазерной сварке проводились на лазерном технологическом комплексе Сибирь с мощным СО<sub>2</sub>-лазером и координатной системой с подвижной оптикой. При исследовании изменений фазового состава вокруг лазерных сварных швов автор использовал возможности экспериментальной станции дифрактометрии коротковолнового рентгеновского диапазона центра коллективного пользования Сибирского центра синхротронного и терагерцевого излучения (ИЯФ СО РАН). Часть исследований выполнялись на базе современного оборудования для металлографических исследований центров коллективного пользования «Механика» (ИТПМ СО РАН) и «Наноструктуры» (ИФП СО РАН).

В главе 3 проведена оптимизация параметров процесса лазерной сварки исследуемых алюминиевых сплавов по скорости сварки, мощности излучения, диаметру, глубине и месту расположения пятна фокусировки излучения, а также параметрам подачи защитного инертного газа с целью получения сварных соединений без явных внешних дефектов.

В частности, было установлено, что для сварки алюминиевых сплавов с добавками меди требуется большая удельная энергия лазерного излучения на единицу объема сварного шва, чем для сплавов, содержащих магний. Значение погонной энергии лазерного излучения оказывается выше во втором случае.

Отмечено снижение прочности сварных соединений, полученных при оптимальных условиях лазерной сварки, по сравнению с прочностью исходного материала. Снижение прочности автор связывает с резким изменением микроструктуры сварных соединений.

Для повышения механических характеристик сварных соединений было предложено два способа последующей обработки сварного шва. Первый подход был основан на холодной пластической деформации области сварного шва. Второй – термическая обработка сварного соединения в процессах закалки и искусственного старения – оказался более эффективным для получения высокопрочных сварных соединений.

В главе 4 на основе технологий термической обработки проведена оптимизация фазового состава для достижения оптимальных механических свойств лазерных сварных соединений алюминиевых сплавов. В результате для всех исследуемых лазерных сварных соединений алюминиевых сплавов были

найжены режимы оптимальной закалки. Показано, что оптимальная закалка не приводит к достижению максимальной прочности соединения. Для достижения максимальных характеристик проводилась процедура искусственного старения лазерных сварных соединений исследуемых алюминиевых сплавов после оптимальной закалки. На всех этапах термической обработки проводился контроль изменения фазового состава материала сварного шва с помощью современных методов дифракционной рентгенометрии, оптической микроскопии высокого разрешения и электронной микроскопии.

В главе 5 приведены результаты циклических испытаний сварных соединений, подвергнутых оптимальной термообработке, на пульсирующее растяжение при различных амплитудах нагрузки в широком диапазоне температур.

В частности, установлено, что прирост деформации на первых циклах нагружения исходного сплава превышает соответствующие значения для сварного соединения более чем вдвое. Автор объясняет этот результат локализацией пластической деформации в сварном шве. При дальнейшем нагружении изменения деформации исходного сплава и сварного соединения остаются близкими, так же, как и предельное количество циклов до разрушения.

Для выяснения причин различного поведения сварных соединений при циклическом нагружении при разных значениях температуры автором были проведены исследования поверхностей разломов сварных швов. Определены особенности трещинообразования, приводящие к разрушению сварного соединения, в зависимости от сорта исследуемых сплавов.

В главе 6 рассмотрена эволюция структурно-фазового состава лазерных сварных соединений в процессе лазерной сварки и различных стадий последующей термической обработки с применением рентгеновской дифрактометрии коротковолнового диапазона, проведенной с помощью синхротронного излучения.

Исследование, в частности, показало, что изменение прочности вследствие закалки при оптимальной температуре физически обусловлено изменением микро- и наноструктуры на границе зерен и гомогенизацией твердого раствора. Показано, как при оптимальном искусственном старении формируется новая микроструктура и фазовый состав сварного шва, который включает преимущественно упрочняющую фазу. Представленные результаты дают исчерпывающую картину изменения механических характеристик лазерных сварных соединений исследуемых алюминиевых сплавов в ходе последующей термической обработки – закалки и искусственного старения. Показано, что изменение механических характеристик обусловлено изменением состояния твердого раствора сварочного шва: микроструктурой, распределением

легирующих элементов, образованием и растворением основных упрочняющих фаз.

В главе 7 обобщены результаты исследований и показано влияние легирующих элементов Mg, Cu, Li на механику структурно-фазового состава и механические характеристики сварного шва.

Показано, что реализованный цикл фазовых превращений в лазерных сварных соединениях алюминиевых сплавов замкнут в смысле достижения прочности образуемого соединения, соответствующей прочности исходного материала.

Проанализировано изменения временного сопротивления, предела текучести и предельного относительного удлинения сварного шва в зависимости от фазового состояния сварного шва после оптимальной закалки и закалки с последующим искусственным старением. Показано, что комплекс прочностных характеристик сварных соединений, полученных при оптимальных условиях лазерной сварки и последующей термической обработки, оказывается близким к комплексу характеристик исходных сплавов в состоянии поставки.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты и выводы.

Следует особенно выделить следующие **новые результаты**, полученные автором диссертации **впервые**:

1. Созданы научные основы технологии лазерной сварки современных термически упрочняемых алюминиевых сплавов, которые позволили получить прочностные свойства сварных соединений близкие или равные характеристикам исходных сплавов.
2. На основе комплексного подхода, включающего оптимизацию процесса лазерной сварки и последующей термической обработки (закалки и искусственного старения), удалось реализовать и проследить цикл фазовых превращений в лазерных сварных соединениях ряда термоупрочняемых алюминиевых сплавов авиационного назначения.
3. Показано, что изменяя параметры термической обработки сварных соединений всех исследованных термически упрочняемых алюминиевых сплавов можно целенаправленно влиять на формирование заданных механических свойств сварного шва за счет изменения структурно-фазового состава.
4. Впервые для исследования эволюции фазового состава сварного шва термически упрочняемых алюминиевых и алюминий-литиевых сплавов марок Д16Т, 1424, 1441, В-1461, В-1469 на различных стадиях термообработки применена дифрактометрия коротковолнового рентгеновского излучения, позволившая с высоким пространственным разрешением измерить распределение фазового состава материала поперек сварного шва.
5. По результатам экспериментальных исследований, на основе оптимизации процесса закалки и закалки с последующим искусственным старением построены

трехмерные карты механических свойств образцов со сварным соединением (временного сопротивления, предела текучести, предельного относительного удлинения) в зависимости от температуры и времени старения всех исследуемых сплавов.

6. Экспериментально показано, что изменение прочности вследствие закалки при оптимальной температуре 560 °С лазерных сварных соединений сплава В-1469 физически обусловлено изменениями микроструктуры материала, приводящими к гомогенизации твердого раствора с образованием промежуточной метастабильной фазы.

7. При испытаниях лазерных сварных соединений алюминиево-литиевых сплавов 1420, 1441 и В-1461 до и после термообработки на циклическое растяжение при повышенных и пониженных температурах показано, что для сварных соединений, прошедших термообработку, количество циклов до разрушения увеличивается в 3-4 раза и приближается к исходному сплаву.

8. Оптимизация лазерного воздействия и последующей термообработки позволили достичь значений прочностных характеристик сварных соединений близких или равных исходному сплаву. Для большинства исследуемых сплавов в области сварного шва достигнутые значения временного сопротивления, предела текучести и величины предельного относительного удлинения сравнимы или превосходят значения соответствующих параметров исходного сплава.

**Достоверность** результатов исследования не вызывает сомнений. Работа отличается разнообразием применяемых методов регистрации комплекса прочностных и микроструктурных характеристик исследуемых образцов, широким использованием методов математического моделирования. Полученные экспериментальные результаты находятся в соответствии с теоретическими оценками. Чувствительность, пространственная и временная разрешающая способность применяемых методов измерений была достаточной для того, чтобы сделать качественные и количественные выводы о структуре исследуемых материалов. Полученные результаты согласуются с опубликованными в научной литературе результатами исследований других авторов смежной тематики.

Следует особо отметить большое **практическое значение** диссертационной работы.

Внедрение полученных автором диссертации результатов по сварке алюминиевых сплавов в авиа- и ракетостроение приведет к снижению материалоемкости и общей массы несущих конструкций летательных аппаратов и предоставит новые возможности для повышения их характеристик. Разработанные технологии могут использоваться в рамках развития государственной программы РФ «Развитие авиационной промышленности создание высоко конкурентной авиационной промышленности и закрепление ее позиции на мировом рынке в

качестве третьего производителя по объемам выпуска авиационной техники». Результаты, диссертации могут быть использованы в научных, учебных и производственных организациях, участвующих в исследованиях, разработках и производстве современной летательной техники и материалов для ее производства. Это в первую очередь предприятия, входящие в ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация», а также ВИАМ, ИЛиСТ, ЦИАМ, НИАТ, МГТУ им Баумана, ИПЛИТ РАН, КАИ, МАИ и другие.

### **Общие замечания**

Принципиальных замечаний по диссертации нет.

Вместе с тем, можно высказать следующие частные замечания:

1. В Главе 1 автор оперирует понятием «качество лазерного пучка» или «качество лазерного излучения»  $K$ , которое правильнее называть «параметр распространения лазерного пучка», как это понятие определяет стандарт ГОСТ Р ИСО 11146-1-2008 (ISO 11146-1:2005). Ссылок на названный стандарт также нет в диссертации.
2. При описании процессов, происходящих при лазерной сварке металлов, автор перечисляет имена исследователей, внесших значительный вклад в исследование этих процессов. Тем не менее, в списке литературы, за редким исключением, отсутствуют конкретные ссылки на оригинальные труды упомянутых автором исследователей.
3. В таблице 1.1 автор приводит типы лазеров, используемых для лазерной сварки. Отдельной строкой в таблице выделен «твердотельный лазер». При этом неясно, о каком конкретно типе лазеров идет речь в данной строке, поскольку дисковый и волоконный лазеры, занимающие две другие строки той же таблицы, также являются твердотельными.
4. К сожалению, текст диссертации, особенно в общих и обзорных его частях, страдает стилистическими неточностями, связанными с согласованием времен, числительных и пр. В некоторых случаях при построении фраз автор пропускает слова, из-за чего смысл предложения может меняться на противоположный. Например, на стр. 54 читаем « Природа этих закономерностей остается открытой ...». По смыслу понятно, что на самом деле открытым остается вопрос о природе закономерностей, то есть природа рассматриваемого явления неизвестна, ее только предстоит открыть. На стр. 30 в первом абзаце можно прочесть: «...представленные в таблице 1.1 лазеры имеют значения  $\Theta$  и  $D$  близкие друг к другу...». На деле же величины параметров  $\Theta$  и  $D$  нельзя сравнивать, поскольку они разнородные, имеют разную размерность. Это утверждение, вставив пропущенное автором слово, надо понимать так, что лазеры имеют близкие величины *произведения*  $\Theta$  и  $D$ , то есть параметра, инвариантного при распространении лазерного излучения и



характеризующего фокусировку лазерного пучка. Однако, следует отметить, что подобными неточностями отличаются в большей степени разделы обзорного характера, более специальные разделы описаны стилистически достаточно точно.

5. На стр. 220-221 вводятся трехиндексные обозначения для направлений в гексагональной кристаллической решетке. Из текста диссертации неясно, к какому типу системы координат они относятся: кристаллографической или кристаллофизической системе координат? Кроме того, для гексагональной кристаллической решетки обычно используют четырехиндексные обозначения.
6. Также обращают на себя внимание следующие опечатки и неточности в тексте диссертации и автореферата:

На стр. 92 в формулах (1) и (2) единичные вектора  $n$  и  $i$  должны быть обозначены как вектора. Например, с помощью полужирного шрифта. Аналогичная опечатка есть в формулах на стр. 19 автореферата.

На стр. 143 диссертации и на стр. 21 автореферата сказано, что графики были построены с помощью графического редактора OriginPro. Тем не менее, это не графический редактор, а программа анализа данных и построения графиков.

В первом абзаце на стр. 17 автореферата приведено: «...скорости сварки  $V$  от 2 до 5 м/мин (33,3-100 мм/с)...». 100 мм/с = 6 м/мин, а не 5 м/мин, как указано.

На стр. 34 автореферата во второй строке не требуется знак равно перед МПа. Есть и другие опечатки.

Указанные замечания не могут считаться принципиальными и не влияют на общие выводы диссертационной работы и справедливость сформулированных в ней научных положений.

### **Заключение**

Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Маликовым А.Г. разработаны научные основы технологии лазерной сварки современных термически упрочняемых алюминиево-литиевых сплавов, произведённых в России, которые позволяют прогнозировать результаты технологических процессов и получать сварные соединения по комплексу характеристик прочности близкие или равные сплошным материалам.

Научные положения, сформулированные в диссертации, достаточно обоснованы и не вызывают сомнений. Результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях, известны широкому кругу специалистов и получили достаточную апробацию на Всероссийских и международных научных конференциях.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Считаем, что диссертация отвечает критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Маликов Александр Геннадьевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.9 (01.02.05) – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Научный доклад Маликова А.Г. по диссертации заслушан и одобрен на объединенном научном семинаре лаборатории механики технологических процессов и лаборатории лазерных разрядов Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН 5 октября 2021 года.

Заключение подготовили:

Заведующий лабораторией лазерных  
разрядов ИПМех РАН,  
д.ф.-м.н.

\_\_ Н.Г. Соловьев

Заведующий лабораторией механики  
технологических процессов ИПМех  
РАН, д.ф.-м.н.

\_\_ Д.С. Лисовенко

Заведующий лабораторией  
взаимодействия плазмы и излучения с  
материалами ИПМех РАН, д.ф.-м.н.

\_\_ А.Ф. Колесников

Подписи Соловьева Н.Г., Лисовенко Д.С. и Колесникова А.Ф. заверяю.

Ученый секретарь ИПМех  
к. ф.-м.н

\_\_ М.А. Котов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,  
Адрес: 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1,  
Тел.: +7-495-434-00-17, E-mail: ipm@ipmnet.ru <http://www.ipmnet.ru>

Сведения о ведущей организации по диссертации

**Маликова Александра Геннадьевича**

**" Управление механикой структурно-фазового состава высокопрочных лазерных сварных соединений термически упрочняемых алюминиевых сплавов "**

по специальности 1.1.9. (01.02.05) — Механика жидкости, газа и плазмы

на соискание ученой степени **доктора технических наук.**

Полное наименование организации в соответствии с уставом:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом:	ИПМех РАН
Ведомственная принадлежность организации	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Полное наименование структурных подразделений, составивших отзыв:	лаборатория механики технологических процессов, лаборатория лазерных разрядов, лаборатория взаимодействия плазмы и излучения с материалами
Почтовый индекс, адрес организации:	119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1
Веб-сайт	<a href="http://www.ipmnet.ru">http://www.ipmnet.ru</a>
Телефон	8-495-434-00-17
Адрес электронной почты	<a href="mailto:ipm@ipmnet.ru">ipm@ipmnet.ru</a>

**Список основных публикаций работников структурных подразделений, составивших отзыв, за последние пять лет по теме диссертации (не более 15 публикаций):**

1. Колесников А.Ф. Эффективный подход к описанию переноса тепла и многокомпонентной диффузии в ионизованных газах // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2018, № 2, с. 139–148.
2. Колесников А.Ф., Гордеев А.Н., Васильевский С.А. Теплообмен в дозвуковых струях диссоциированного азота: эксперимент на ВЧ-плазмотроне и численное моделирование // Теплофизика высоких температур, 2018, т. 56(3), с. 417-423
3. Епишин А.И., Лисовенко Д.С. Экстремальные значения коэффициента Пуассона кубических кристаллов // Журнал технической физики, 2016, т. 86(10), с. 74-82
4. Rysaeva L.K., Lisovento D.S., Gorodtsov V.A., Baimova J.A. Stability, elastic properties and deformation behavior of graphene-based diamond-like phases // Computational Materials Science, 2020, v. 172, 109355
5. Lavrentyev S.Yu., Solovyov N.G., Shemyakin A.N., Yakimov M.Yu. Hydrodynamic phenomena in optical discharges in liquids under self-focusing of periodic-pulse laser radiation // J. Phys.: Conf. Ser., 2020, 1698, 012017
6. Shemyakin A.N., Rachkov M.Yu., Solovyov N.G., Yakimov M.Yu. Radiation power control of the industrial CO<sub>2</sub> lasers excited by a nonself-sustained glow discharge with regard to dissociation in a working gas mixture // Optics and Laser Technology, 2018, v. 98(1) pp.198–204
7. Зимаков В.П., Кузнецов В.А., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Шилов А.О., Якимов М.Ю. Взаимодействие лазерного излучения ближнего ИК-диапазона с плазмой непрерывного оптического разряда // Физика плазмы, 2016, т. 42, №1, с. 74-80.

Ученый секретарь ИПМех РАН



М.А.Котов