

РЕНТГЕНОИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ТОПЛИВНОГО ФАКЕЛА

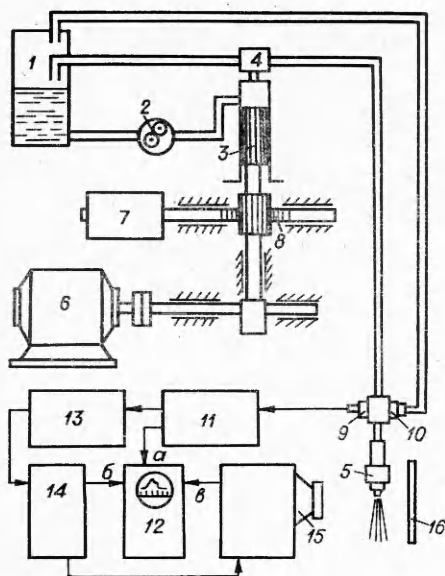
*В. К. Баев, А. Н. Бажайкин, Е. И. Биченков,
А. А. Бузуков, Р. Л. Рабинович, Б. П. Тимошенко
(Новосибирск)*

Для построения аналитических моделей [1—3] развития топливного факела, образующегося при высоконапорном импульсном впрыске топлива в рабочую камеру, например в условиях работы дизельных двигателей, используются эмпирические данные о движении его внешних границ, получаемые преимущественно методами скоростной киносъемки. При этом в большинстве случаев предполагается равномерное распределение топлива в теле факела и используется средняя скорость истечения топлива из соплового отверстия. Между тем исследованиями [4, 5] показано, что в развитии факела существенное значение имеют нестационарные явления, вызванные пульсациями давления в топливной системе, что приводит к неоднородности структуры факела, образованию в нем областей с повышенной или пониженной плотностью жидкого компонента. Точное же знание распределения топливного компонента в теле факела необходимо для развития правильных представлений о процессах воспламенения и горения топлива. Оптическими методами изучение внутренней структуры факела затруднено, так как он представляет собою образование, заполненное большим количеством мелких капелек топлива, и оптически непрозрачен. Попытки же изучать факел путем сечения его различного рода сепараторами [5, 6] также не дают объективной информации, так как внесение в факел отсекающих элементов искажает истинное распределение топливного компонента. Использование лазерно-голографических методов изучения процесса развития топливного факела [7] в принципе позволяет получать информацию о его внутренней структуре, однако сложности методического порядка, а также принципиальные ограничения, накладываемые эффектом Дошлера [8], не позволили до настоящего времени этот метод широко внедрить в практику измерений.

Непосредственное распределение топливного компонента в факеле возможно получить путем его рентгенографирования. Первые опыты, в которых велось качественное наблюдение развития струи топлива, выбрасываемого из макета дизельной форсунки, проведены в 1958 году и описаны в [9]. Однако используемая техника не позволила тогда провести строгий количественный анализ явления. Трудности здесь заключаются в необходимости получения импульса достаточно большой дозы мягкого рентгеновского излучения длительностью не более нескольких десятков наносекунд и с эффективным размером источника излучения в доли миллиметра. Только при выполнении этих условий возможна расшивка быстро движущихся элементов топливного факела, обладающего относительно малой рентгенопоглощающей способностью. И если для импульсного рентгенографирования относительно крупных струй решение такой задачи не составляет особого труда [10], то для получения рентгенограммы топливного факела, имеющего характерные размеры несколько сантиметров и среднюю плотность, близкую к плотности окружающей среды, необходимы разработка особого режима работы источника рентгеновского излучения и введение в топливо рентгеноконтрастных присадок [11].

В данной работе приводятся результаты экспериментов, показывающие возможность применения рентгеноимпульсного метода для качественного и количественного изучения внутренней структуры топливного факела в процессе его развития. Впрыск топлива осуществлялся в воздух при нормальных условиях.

Постановка эксперимента. Схема установки для импульсного рентгенографирования топливного факела приведена на фиг. 1. Смесь дизельного топлива и рентгеноконтрастного вещества (йодистый этил) в пропорции 1 : 1 из бачка 1 с помощью подкачивающей помпы 2 и плунжерного насоса 3 через нагнетательный клапан 4 подавалась в стандартную дизельную форсунку 5, оснащенную однодырчатым распылителем с диаметром сопла 0,25 мм. В корпусе форсунки непосредственно перед распылительной го-



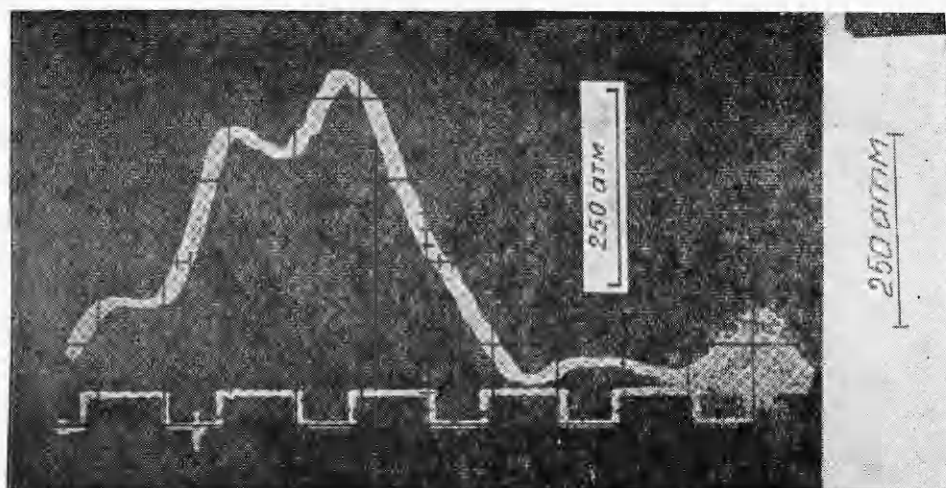
Ф и г. 1

ловкой находится игольчатый клапан, отрегулированный так, что истечение топлива из сопла распылителя начиналось только при достижении давления в топливной системе свыше 250 атм. Система управления топливной аппаратурой обеспечивала ее работу в режиме единичного впрыска. После сигнала о готовности всего комплекса аппаратуры и достижения заданных оборотов вала основного двигателя 6, работающего на плунжерный насос (900 ± 10 об/мин), по команде оператора с помощью электромагнита 7 производилась перестановка рейки 8 топливного насоса на время одного хода плунжера с нулевой производительности на максимальную, составлявшую 0,135 см³/цикл. Перед форсункой смонтирован измерительно-регулирующий узел, в котором установлен пьезокварцевый датчик типа ЛХ-600 9 измерения давления в топливной системе и жиклер 10 для сброса излишков топлива обратно в бачок и приведения режима работы топливной системы к характерному для реального двигателя.

Для обеспечения синхронизации и контроля работы всех систем установки сигнал с датчика давления поступал на высокоомный предусилитель ББТ-1 11, обладавший входным сопротивлением не ниже 10¹⁰ Ом, шунтированный с целью избежания перегрузки емкостью 0,05 мкФ, а оттуда на один из лучей осциллографа С8-11 12 (канал а). Высокая постоянная времени системы датчик — предусилитель позволяла осуществлять ее статическую тарировку на специальном гидропрессе.

Параллельно сигнал подавался на селективный усилитель У2-6 13, формировавший фронт синхронизирующего импульса по началу подъема давления в топливной системе, и затем на генератор импульсов Г5-15 14. С генератора импульсы поступали на запуск разверток осциллографа (канал б) и с требуемым временем задержки на запускающее устройство импульсного рентгеновского аппарата 15. Второй луч осциллографа исполнял контрольные функции, на него подавался меандр с частотой 1 кГц и импульс, фиксирующий время рентгеновского излучения (канал в).

Импульсный рентгеновский аппарат представляет собою вариант аппарата серии ПИР, разработанного в Институте гидродинамики СО АН СССР [12], и изготовлен на базе аппарата ПИР-600 [13]. Рабочее напряжение импульсного трансформатора составляло около 100 кВ, ударная емкость (200 пФ) образована отрезком коаксиала, скомпанованным с импульсным трансформатором. Напряжение в первичной цепи составляло 10 кВ. В аппарате использовался один из вариантов острофокусной отпаянной рентгеновской трубки типа ИМА-5 [14]. Применение относительно большой ударной емкости и малогабаритной отпаянной рентгеновской трубки, а также тщательное изготовление разрядной цепи с минимальными индуктивностями позволили получить короткий (до 20 нс) импульс относительно мягкого рентгеновского излучения и обеспечить его дозу, достаточную для рентгенографирования на безэкранную пленку 16. Выбранная схема позволила разрешать на рентгенограммах капли размером до 30 мкм.



Ф и г. 2

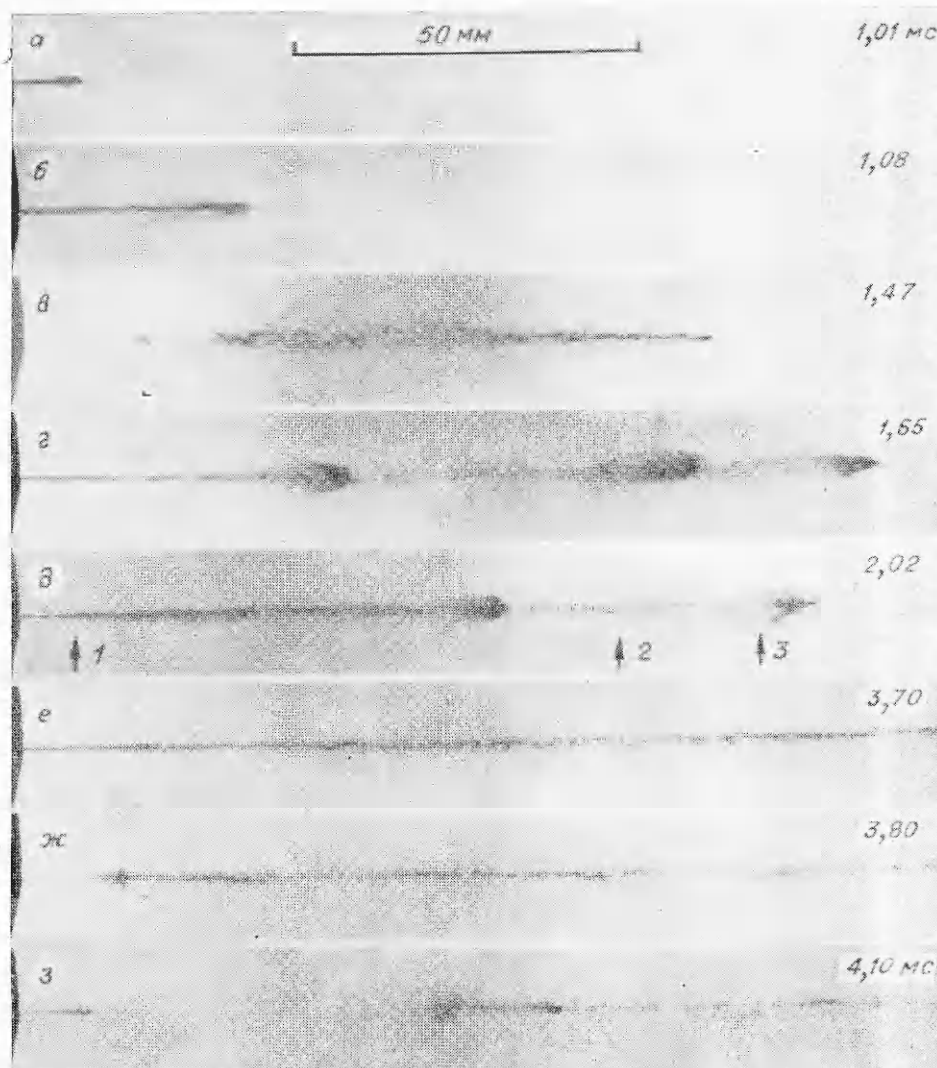
Применение усиливающих экранов существенно снижает величину необходимой дозы излучения, но сильно «смазывает» изображение и ухудшает пространственное разрешение деталей струи.

Результаты экспериментов. На фиг. 2 приведена типичная осциллограмма давления в топливной системе. Здесь характерным является трехступенчатый подъем давления с частотой пульсации 0,7 мс и относительно плавный спад в течение 1,3 мс. Наличие пульсаций давления на стадии его подъема связано с приходом волн разгрузки при подъеме иглы форсунки и началом истечения топлива из сопла, а также развитием автоколебательных процессов в трубопроводах и накопительных емкостях форсунки. Истинное же давление в жидкости непосредственно перед соплом распылителя несколько отличается от того, которое записывается датчиком давления, расположенным в измерительно-регулирующем узле на расстоянии 10—12 см от форсунки. Это связано со сложным характером перетекания топлива из магистрали в пространство над клапанной иглой, наличием фильтров тонкой очистки в форсунке и т. д. [2]. Поэтому режим нарастания давления перед соплом распылителя менее крутой, а высокочастотные составляющие колебаний давления сглажены.

На втором луче на фиг. 2 отмечен момент излучения рентгеновского импульса через 1 мс после начала подъема давления в топливной системе.

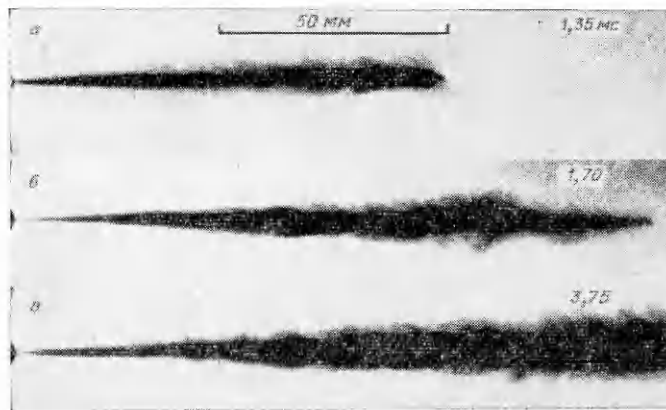
На фиг. 3 приведена серия фоторепродукций с рентгенограмм, снятых в различные моменты развития топливного факела. Эти кадры не являются последовательными, выполненными при одном и том же впрыске. Но так как картина развития факела стабильно повторяется от опыта к опыту, то на фиг. 3 представлена подборка, отображающая характер этого процесса во времени. На всех кадрах струя распространяется слева направо, в левой части кадра виден край боковой кромки форсунки.

Изучение приведенного материала показывает, что в начальной стадии развития струи до расстояния 40—50 мм ее головная часть взаимодействует со средой по классическому кумулятивному механизму [15] с образованием характерного для этого случая срыва пелены жидкости с фронтальной поверхности (фиг. 3, а, б). При обычной оптической съемке такая сложная структура струи наблюдаться не может, так как пелена распыленного топлива, концентрическим образом окружающая центральную относительно компактную струю жидкости, полностью затеняет ее. Для

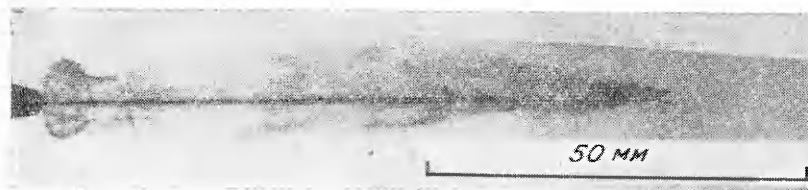


Ф и г. 3

сравнения на фиг. 4 приведены фотографии топливного факела, снятые в том же масштабе, но в проходящем свете с помощью искровой подсветки (время экспозиции ~ 1 мкс). Кадры *a—в* на фиг. 4 соответствуют по моменту съемки кадрам *в, д, ж* на фиг. 3. На приводимых рентгенограммах пелена распыленной жидкости, окружающая центральную струю, просматривается слабо, так как концентрация рентгеноконтрастного вещества была выбрана таким образом, чтобы пелена не затеняла струю. При соответствующем выборе концентрации иодистого этила можно наблюдать как центральную струю, так и окружающие ее слои распыленной жидкости. В качестве примера на фиг. 5 приведена репродукция с рентгенограммы, зафиксировавшей процесс распыления струи топлива при работе насоса-форсунки АР-21. Примечательным на этой рентгенограмме является образование непосредственно вблизи сопла форсунки компактного ядра, получившегося при раздроблении высокоскоростной струей капельки топлива, выбрасываемой из сопла перед началом выхода струи. Такой режим работы насоса-форсунки является характерным.



Ф и г. 4

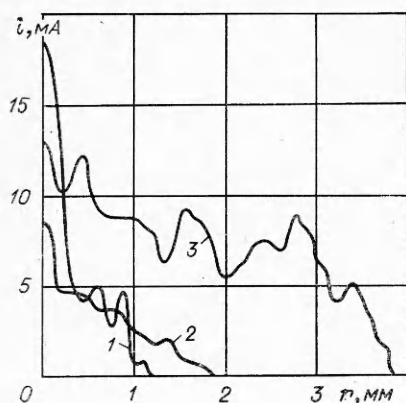


Ф и г. 5

При достижении расстояния 60—70 мм струя теряет сплошность и начинает дробиться, проявляются зоны сгущения и разрежения топливного компонента. Заметим, что на этой стадии явления давление в топливной системе еще продолжает повышаться и скорость истечения жидкости из сопла форсунки нарастает. Поэтому последующие участки струи разбивают более медленные предыдущие, и в теле факела периодически образуются зоны повышенной концентрации жидкости, не наблюдаемые при обычных оптических съемках (фиг. 3, *в—д*). Примечательно, что образование этих последовательных зон сгущений в струе не коррелируется с пульсациями давления в топливной системе, а связано, возможно, с проявлением некоторого вида гидродинамической неустойчивости. До того момента времени, пока скорость истечения жидкости из сопла распылителя нарастает, каждый последующий участок струи с определенной периодичностью образует в своей головной части возмущение, плотность струи в этом месте возрастает, происходит подтормаживание потока и в образовавшуюся «ловушку» втекает остальная часть участка струи. Процесс распыления головной части такого отрезка струи также идет по кумулятивному механизму (фиг. 3, *г, д*), причем каждый последующий жидкий боек продвигается во все более плотной топливо-воздушной среде.

Когда давление в топливной системе начинает спадать, скорость истечения струи уменьшается и вдоль нее устанавливается отрицательный продольный градиент скорости. В этом случае образование неоднородностей в теле струи прекращается (фиг. 3, *е, ж*).

На фиг. 3, *ж, з* представлены репродукции с рентгенограмм, экспонированных на заключительной стадии явления. На них видна хвостовая часть струи, оканчивающаяся выбросом заключительного сгустка топлива при закрытии клапанной иглы. На фиг. 3, *з* зафиксирован так называемый подвыпрыск, т. е. характерный для работы форсунок с клапанной иг-



Ф и г. 6

лой кратковременный выброс небольшой порции топлива, когда хвостовая часть основной струи уже ушла от сопла форсунки. Этот выброс получается при гидравлическом ударе в топливной системе и связанном с ним кратковременном повышении давления при резком закрытии клапана.

Для получения количественных зависимостей при выполнении рентгеновских снимков на каждую кассету наклеивался полигон из полихлорвиниловой пленки. Путем фотометрирования участков негатива с проекциями полигона с различной суммарной толщиной пленки для каждой рентгенограммы были построены тарировочные кривые,

по которым определялась степень ослабления негатива при поглощении рентгеновских квантов в зависимости от местной толщины пленки. Эти кривые использовались при обработке результатов микрофотометрирования струи топлива с целью количественного анализа распределения топливного компонента в теле факела.

В качестве примера на фиг. 6 приведены показания гальванометра микрофотометра в зависимости от радиуса струи, полученные при обработке рентгенограммы, репродукция с которой представлена на фиг. 3, ∂ в трех сечениях (указано стрелками 1, 2, 3). Размер фотометрируемого участка в этих измерениях составлял 100×250 мкм (большая сторона участка расположена вдоль струи) и шаг промеров 100 мкм. Обработка негатива велась от оси струи до точки, где исчезал сигнал, наложенный на фоновую засветку. Представленные графики характеризуют общее количество топлива в факеле и неоднородности в его распределении в рассматриваемых сечениях. Интегрирование площади под кривыми 1 — 3 на фиг. 6 показывает, что в сгустках накапливается в 7—10 раз большее количество топлива, чем в местах разрежения или вблизи среза сопла форсунки.

Выводы. 1. Разработан и применяется в практике научного исследования переносной импульсный рентгеновский аппарат для изучения внутренней структуры гидрогазодинамических потоков малой плотности, позволяющий разрешать детали размером до 30 мкм на безэкранный рентгеновскую пленку.

2. Разработана методика изучения внутренней структуры топливного факела в условиях работы натуральных дизельных форсунок.

3. Сравнение с оптической съемкой показывает, что регистрируемая в видимом свете форма факела определяется пеленой жидкости, срываемой со струи, и не соответствует истинному распределению топлива в струе.

4. Экспериментально показано, что струя топливо-воздушной смеси представляет собой существенно неоднородную структуру и концентрация и общее распределение жидкого компонента вдоль нее в различных сечениях отличаются на порядок.

5. Образование сгустков топлива внутри струи не связано непосредственно с пульсациями давления в топливной системе, а, возможно, является следствием гидродинамической неустойчивости, так как такое течение существует только в тот отрезок времени, когда давление в топливной системе нарастает и вдоль струи устанавливается положительный продольный градиент скорости.

Поступила 12 I 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Лышевский А. С. Распыливание топлива в судовых дизелях. Л., Судостроение, 1971.
2. Астахов И. В., Трусов В. И., Хачиян А. С. Подача и распыливание топлива в дизелях. М., Машиностроение, 1972.
3. Свиридов Ю. Б. Смесеобразование и сгорание в дизелях. М., Машиностроение, 1972.
4. Трусов В. И., Иванов Л. Л. Некоторые предпосылки к формированию физической модели распыленной струи при впрыске топлива в дизеле.— В кн.: Двигатели внутреннего сгорания. Вып. 2. Ярославль, изд. Ярослав. политехи. ин-та, 1975.
5. Трусов В. И., Иванов Л. Л. Расчетно-экспериментальное исследование некоторых параметров сред, образующихся при распыливании топлива в дизелях.— В кн.: Топливная аппаратура дизелей. Вып. 3. Ярославль, изд. Ярослав. политехн. ин-та, 1975.
6. Мухаметжанов С. Г., Семенов Б. Н. Скоростное микрофотографирование процесса распыления топлива.— Журн. научн. и прикл. фотографии и кинематографии, 1965, № 5.
7. Мороз Э. В., Ханин Н. С. Голографические методы исследования быстропотекающих процессов в дизелях.— Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение, 1976, № 7.
8. Антонов Е. А. Особенности голографической регистрации быстропотекающих процессов.— В кн.: Голография. Вып. 2. М., изд. Всесоюз. научн.-иссл. ин-та оптико-физических измерений, 1972.
9. Кутовой В. А. Распыливание топлива дизельными форсунками. Вып. 8. М., изд. НИИ, 1959.
10. Бородин В. П. Исследование высоконапорных импульсных струй при помощи рентгенографии.— ПМТФ, 1965, № 5.
11. Reinecke W. G., Waldman G. D. An investigation of water drop desintegration in the region behind strong shock waves.— In: Proc. of the 3th Intern. Conf. on Rain Erosion and Related Phenomena. Wintley. Hampshire, 1970. Рус. пер. Исследование процесса распада водяной капли за фронтом сильной ударной волны.— ВИНТИ, пер. № 95128/1, 1972.
12. Биченков Е. И., Рабинович Р. Л. Переносные импульсные рентгеновские аппараты с безжелезным трансформатором.— В кн.: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы развития высокоскоростной фотографии и кинематографии и метрологии быстропотекающих процессов». М., изд. ВНИИОФИ, 1978.
13. Рабинович Р. Л. Переносной импульсный рентгеновский аппарат.— В кн.: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы развития высокоскоростной фотографии и кинематографии и метрологии быстропотекающих процессов». М., изд. ВНИИОФИ, 1978.
14. Белкин И. В., Александрович Э.-Г. В. Двухэлектродная трубка для генерации наносекундных импульсов рентгеновского излучения.— ПТЭ, 1972, № 2.
15. Лаврентьев М. А. Кумулятивный заряд и принцип его работы.— УФН, 1957, т. 12, вып. 4.

УДК 533.09

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ДЛИННОЙ СКОЛЬЗЯЩЕЙ ИСКРЫ**

*С. И. Андреев, Е. А. Зобов, А. Н. Сидоров,
В. Д. Костоусов
(Ленинград)*

Исследуются пробойные характеристики скользящих искр длиной до 2,5 м различных газов при разных давлениях. В работах [1, 2] описаны исследования скользящих искр в воздухе при атмосферном давлении. В данной работе исследования проводились в аргоне, неоне, гелии и воздухе при давлениях от 10 до 1600 мм рт. ст. Скользящий разряд возникал на поверхности диэлектрической пленки, которой была обернута металлическая труба, присоединенная к одному из электродов (так называемый «инициатор»). Диаметр инициатора был равен 40 мм. Толщина пленки составляла 0,4—4 мм. Длина разрядного промежут-