

**ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ
ОКОЛОПРЕДЕЛЬНЫХ МЕТАНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ
КОМБИНИРОВАННЫМ ИСКРОВОМ РАЗРЯДОМ
С ВАРЬИРУЕМЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

В. П. Карнов, В. В. Маслов, Е. С. Северин
(Москва)

В последние годы внимание многих исследователей вновь сосредоточивается на экспериментальном изучении микрофизических и химических процессов, протекающих при искровом разряде с варьируемой динамикой энерговыделения, и анализе их влияния на воспламенение топливно-воздушных смесей в различных условиях. Повышенный интерес к подобному рода исследованиям обусловлен не только становящейся все более острой необходимостью форсирования процессов воспламенения бедных смесей, но и появлением нового класса систем зажигания, способных генерировать разряды сложной формы и осуществлять гибкое эксплуатационное регулирование их параметров.

Известно, что проблемы использования бедных топливно-воздушных смесей во многом связаны с трудностями их воспламенения, определяемыми более высоким уровнем потребной для этого энергии. Различные типы интенсифицированных источников воспламенения, таких как плазменные, лазерные системы, могут заметно улучшить процессы зажигания и сгорания [1—3], но в настоящее время большинство из них еще не готово для широкого промышленного применения. С другой стороны, в тех же смесях пределы воспламенения могут быть в значительной степени расширены снижением критического барьера зажигания — минимальной энергией воспламенения, которая зависит от большого числа факторов. Среди них форма электрического искрового разряда, широко применяемого для инициирования горения в различных системах, в частности в двигателях внутреннего сгорания, должна быть выделена особо. Исследования показывают, что минимальная энергия воспламенения есть функция характеристик инициирующего разряда [4, 5] и может быть снижена в определенной степени их варьированием и оптимизацией.

До недавнего времени эксплуатационное варьирование параметров искрового разряда даже в небольших пределах практически было неосуществимо, так как классические батарейные системы зажигания для этого не приспособлены. Современные электронные системы, способные генерировать комбинированные разряды сложной формы, а также все более широко внедряющиеся цифровые блоки многофакторного управления ими открывают более реальные возможности такого варьирования, однако для его обоснования и эффективного применения необходимо проведение глубоких исследований в данной области.

Приходится констатировать, что в большинстве случаев авторы известных публикаций расходятся во мнениях относительно роли и преимуществ тех или иных характеристик разряда при воспламенении. Диаметрально противоположные оценки, например, даются разрядам

кратковременным и длительным, сильно- и слаботочным, чередующейся полярности и монополярным и т. п. [1, 4—9]. Такая противоречивость объясняется различными методами исследований и используемой экспериментальной техникой, отсутствием четкой и однозначной теоретической трактовки механизма искрового зажигания, сложностью и значительной условностью математического моделирования его процессов даже при простейших формах разряда. Последнее усугубляется еще и тем, что в условиях бедных смесей применение сложных комбинированных разрядов и нетрадиционных типов разрядников может усиливать относительную роль электромагнитных и электростатических эффектов [4, 7], газодинамических возмущений [1, 6], вызванных действием самого разряда, которые в значительной степени усложняют механизм искрового зажигания, более или менее удовлетворительно описываемый тепловой теорией, положенной в основу большинства существующих моделей. Все это говорит о большой сложности и малоизученности вопроса, необходимости накопления как можно большего объема статистических данных, полученных в равных условиях эксперимента.

Основная цель настоящего исследования — изучение возможностей оптимизации параметров многокомпонентного комбинированного искрового разряда на фоне широкого варьирования его токовременных и интегрально-энергетических характеристик, величины разрядного промежутка, состава смеси и условий ее воспламенения. Эксперименты проводили при ламинарных и турбулентных условиях в различных по конструкции, форме и объему камерах сгорания (бомбах). Исследовали зажигание главным образом бедных и околопредельных метано-воздушных смесей, содержащих от 4,6 до 5,3% C_2H_4 . Использование в качестве объекта испытаний околопредельных смесей, характеризующихся значительным ослаблением кинетического механизма формирования в них начального очага горения, позволяет наиболее рельефно проследить влияние иницирующих факторов искрового разряда на эти процессы. Воспламенение в камерах осуществлялось при комнатной температуре и давлении от 0,02 до 0,3 МПа. Начальный очаг горения и распространение пламени регистрировали скоростной кинокамерой (объективами с различным фокусным расстоянием), изменение давления в течение первых 30 или 100 мс — высокочувствительным датчиком. Межэлектродный зазор разрядника, находящийся в центре камер, изменялся от 0,1 до 4,0 мм. Electroды располагались в горизонтальной плоскости, конечные участки их имели диаметр 1 мм и были заточены под углом в 45° .

Смесь поджигали специальной стендовой системой, разработанной в Волгоградском политехническом институте, которая обеспечивала различные по форме и по количеству компонент разряды с точно известными и независимо регулируемыми токовременными и энергетическими характеристиками. Исследования, проведенные ранее в ВолгПИ при варьировании тока и длительности разрядов различной формы, показали важную роль обоих этих параметров в формировании начального очага горения [10]. Они свидетельствуют, что в околопредельных смесях ни кратковременные сильноточные, ни длительные слаботочные разряды даже очень высокой энергии чаще всего не способны иницировать развитые процессы горения. При воспламенении таких смесей иницирование начального очага и развитие его в самораспространяющееся пламя требуют не только значительной начальной термической активации смеси в зоне разрядного промежутка, но и определенного последующего воздействия конечной части разряда на формирующийся очаг. Как показали исследования, к таким требованиям приближается многокомпонентный комбинированный разряд, форсированный по току лишь на начальной стадии и содержащий завершающую длительную слаботочную компоненту. Ниже рассматриваются особенности зажигания трехкомпонентным комбинированным разрядом, реализующим подобные зависимости.

Первая составляющая такого разряда объединяет процессы быстрого роста высокого напряжения ($\frac{dU}{dt} = 2,5 \text{ кВ/мкс}$), пробоя межэлектродного зазора разрядника и емкостной фазы разряда, имевшей в зависимости от условий эксперимента энергию 0,2—5,0 мДж. За ней следует вторая компонента длительностью $\tau_2 = 0,2 \text{ мс}$, в которой средние значения тока I_2 варьировались от 30 до 500 мА. Завершает разряд третья компонента со средним током $I_3 = 30 \text{ мА}$ и $\tau_3 = 0,4 \div 6,5 \text{ мс}$, отсчитываемой от момента пробоя. В данной серии экспериментов τ_2 и I_3 не менялись. Максимальный уровень суммарной энергии, выделявшейся в разряде, достигал 295 мДж, при этом распределялась она по отдельным компонентам следующим образом: в первой 5, во второй 100, в третьей 190 мДж. Во второй и третьей компонентах энергия могла независимо меняться от нуля до указанного выше уровня.

В настоящей работе излагаются результаты исследования критических условий зажигания при независимом варьировании тока второй и длительности третьей компонент разряда. Анализ влияния этих факторов на особенности формирования начального очага горения, распространение пламени, изменение давления в камерах и возможности форсирования перечисленных процессов — тема самостоятельного обсуждения. Проведенные эксперименты показали, что при определенных комбинациях токовременных и энергетических показателей отдельных фаз многокомпонентного разряда минимальная энергия воспламенения как бедных, так и богатых околопредельных смесей может в значительной степени изменяться, особенно при малых величинах межэлектродного зазора и низких давлениях. В данном случае под минимальной энергией воспламенения понимается суммарное количество электрической энергии, выделившееся в искровом разряде при критических значениях тока и длительности второй и третьей его компонент, т. е. при таких их сочетаниях, когда даже незначительное уменьшение любого из называемых параметров без соответствующего изменения другого приводит к пропуску зажигания.

Рис. 1 иллюстрирует типичный характер зависимостей минимальной энергии воспламенения и минимально потребной (критической) длительности третьей компоненты разряда от тока второй его составляющей при разных величинах межэлектродного зазора разрядника d , давлениях p_0 и составах неподвижной смеси. Видно, что во всех показанных случаях имеются четко выраженные оптимальные сочетания I_2 и τ_3 , при которых величина E_{\min} приобретает наименьшее значение. Удаление от оптимальных точек приводит к росту энергии, которая должна быть выделена в искровом разряде, чтобы воспламенить смесь. Резкий рост E_{\min} слева от этих точек обусловлен тем, что даже незначительное уменьшение тока по сравнению с оптимальным и связанное с этим снижение энергии второй компоненты требуют для воспламенения отнюдь не адекватного, а гораздо большего роста энергии и длительности третьей компоненты. Справа от точек $I_2 = I_{\text{опт}}$, напротив, форсирование тока, как правило, приводит к снижению потребной для воспламенения длительности разряда, но в данном случае рост E_{\min} определяет преобладающее увеличение энергии второй компоненты по сравнению с убыванием энергии третьей.

Из таблицы, в которой приведены конкретные значения энергии второй E_2 и третьей E_3 компонент разряда для некоторых точек кривой 3 на рис. 1, следует, что в области $I_2 < I_{\text{опт}}$ уменьшение E_2 лишь на 18 мДж требует в качестве компенсации увеличения E_3 на 62 мДж, а в области $I_2 > I_{\text{опт}}$ рост E_2 на 75 мДж приводит к снижению E_3 только на 14 мДж. В ряде случаев (например, рис. 1, 1) повышение I_2 сверх оптимальных значений сопровождается даже определенным ростом критической длительности третьей компоненты и ее энергии. При воспламенении некоторых горючих смесей отмеченные выше тенденции в еще большей степени усиливаются. В частности, замена воздуха в исследуе-

I_2 , мА	τ_3 , мс	E_2 , мДж	E_3 , мДж	E_{min} , мДж	I_2 , мА	τ_3 , мс	E_2 , мДж	E_3 , мДж	E_{min} , мДж
30	5,3	2	121	128	250	3,4	45	47	97
60	4,9	4	95	104	350	3,3	70	45	120
100	4,3	12	69	86	450	3,3	95	45	145
150	3,8	20	59	84					

Примечание. $[CH_4] = 4,8\%$, $p_0 = 0,1$ МПа, $d = 4$ мм, $E_1 = 5$ мДж.

мых смесях кислородно-гелиевой смесью настолько резко сужает диапазон допустимых комбинаций характеристик разряда, что при малых величинах межэлектродного зазора уменьшение I_2 лишь в 1,2 раза относительно оптимального его значения приводит к более чем тридцатикратному росту потребной для воспламенения продолжительности разряда и энергии соответствующей его фазы. Чем беднее смесь, меньше межэлектродный зазор разрядника и чем ниже давление, тем выше значения I_2 и τ_3 , при которых происходит воспламенение, и тем резче увеличивается E_{min} при отклонении от оптимальных их сочетаний. По этой причине ни кратковременные сильноточные, ни длительные слаботочные разряды повышенной энергии не могут воспламенить околопределные смеси при уменьшении межэлектродного зазора и давления.

Показательным в этом отношении может быть рис. 2, на котором сопоставлены зависимости минимальной энергии воспламенения, взятые при разных фиксированных величинах I_2 и варьируемых критических параметрах третьей компоненты. Здесь же нанесены значения E_{min} , имеющие место при оптимальных (варьируемых) сочетаниях I_2 и τ_3 . Приведенные данные наглядно свидетельствуют о росте затрат энергии на воспламенение при отклонении разрядного тока от оптимального, особенно при его увеличении (кривая 3 здесь соответствует $I_2 < I_{opt}$). Вместе с тем из рис. 2 следует также, что точки резкого перегиба кривых $E_{min} = f(d)$, характеризующие гасящее расстояние электродов, с ростом тока смещаются в область меньших значений d . При этом, как показывает анализ полученных экспериментальных данных, сокращаются потери тепла в электроды за счет более быстрого удаления от них основной части формирующегося очага горения, но возрастают потери его в окружающую смесь, в частности, из-за увеличения соотношения поверхности очага к его объему.

Последнее обстоятельство подчеркивает важность дифференцированного подхода к выбору токовременных параметров инициирующего разряда, предназначенного для воспламенения горючих смесей с различными физико-химическими характеристиками. Например, оптимальные сочетания тока и длительности разряда при воспламенении смесей метана, кислорода и гелия примечательны тем, что при зазорах, меньших гасящего расстояния, повышение минимально потребной для воспламенения энергии достигается преимущественным ростом тока при небольшом увеличении критической длительности (рис. 3). Это объясняется ростом толщины фронта ламинарного пламени данных смесей, которые требуют для формирования очага горения увеличения начальной термической активации его и большей компенсации охлаждающего действия электродов, чем метано-воздушные смеси. Как видно из рис. 2, последнее может быть достигнуто соответствующим повышением тока начальной фазы разряда.

Интересно отметить, что при инициировании горения в неподвижных околопределных смесях многокомпонентными варьируемыми разрядами весьма специфичным становится влияние на E_{min} начального давления. При зажигании кратковременными сильноточными или длительными слаботочными разрядами с фиксированными характеристиками уменьшение p_0 в диапазоне ниже атмосферного сопровождается монотонным увеличением E_{min} , в то время как при варьировании тока и длительно-

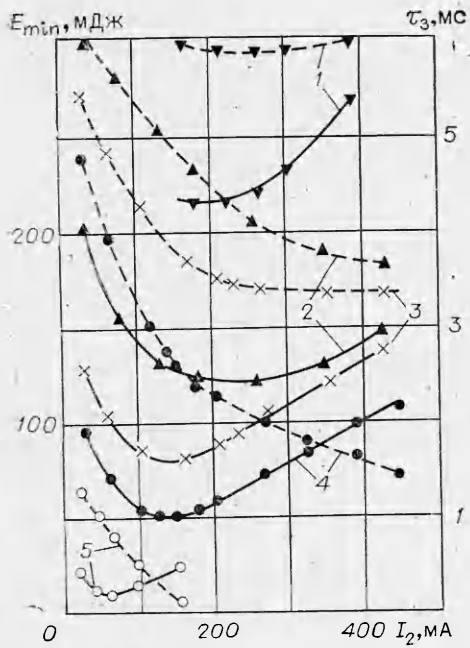


Рис. 1. Зависимость минимальной энергии воспламенения E_{min} от критических сочетаний тока I_2 второй и длительности τ_3 третьей компонент комбинированного разряда при разных условиях зажигания неподвижных смесей: CH_4 , %: 1, 3—4,8, 2, 5—5,1, 4—4,9. d , мм: 1, 3—5—4, 2—1. p_0 , МПа: 1—0,4, 2—5—0,1. — E_{min} ; - - - τ_3 .

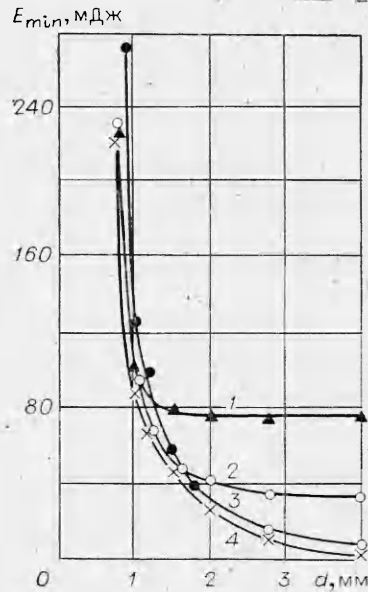


Рис. 2. Влияние тока второй компоненты разряда и величины межэлектродного зазора на E_{min} ; $[CH_4] = 5,2\%$. I_2 , мА: 1—350, 2—200, 3—100; 4— $I_2 = I_{opt}$.

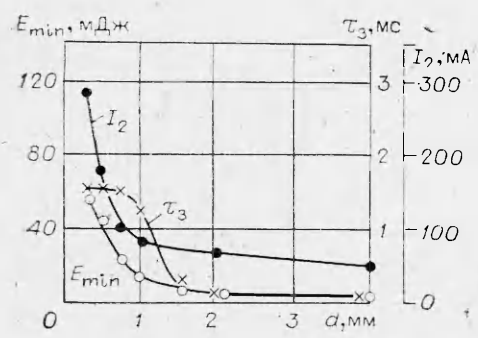


Рис. 3. Зависимость E_{min} смеси $CH_4 + 2O_2 + 9He$, оптимальных значений тока второй и длительности третьей компонент разряда от величины межэлектродного зазора.

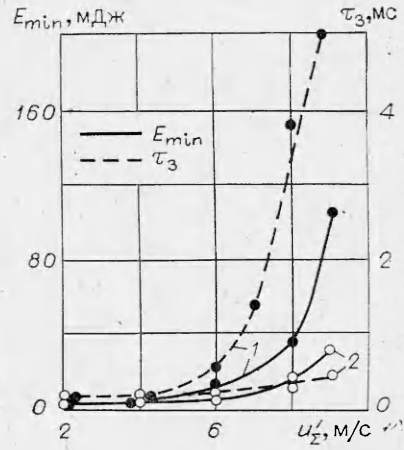


Рис. 4. Зависимость E_{min} и критической длительности разряда от степени турбулентности смеси при фиксированных и оптимизируемых (варьируемых) величинах I_2 ; $[CH_4] = 6,54\%$, $d = 4$ мм. 1— $I_2 = 30$ мА; 2— $I_2 = I_{opt}$.

сти компонент разряда и оптимизации их сочетаний наименьшие E_{min} смещаются в область $p_0 < 0,1$ МПа. Например, при величине $I_2 = 180$ мА, близкой к оптимальной для данных условий, и варьируемой длительности разряда τ_3 минимальные значения E_{min} в диапазоне концентраций CH_4 от 4,6 до 5,1% наблюдаются при $p_0 = 0,06 \div 0,08$ МПа. При относительно невысоких уровнях энергии инициирующего разряда оптимиза-

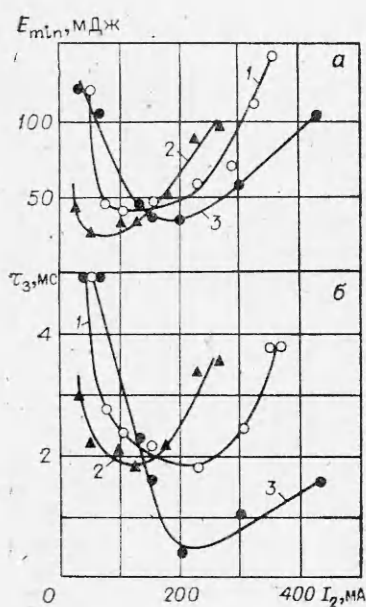


Рис. 5. Влияние тока второй компоненты разряда и величины межэлектродного зазора на E_{\min} (а) и τ_3 (б) при интенсивной турбулизации смеси; $[\text{CH}_4] = 6,54\%$, $u_{\Sigma} = 9$ м/с.

d , мм: 1 — 1, 2 — 2,5, 3 — 4.

ция его характеристик обеспечивает устойчивое воспламенение околопредельных метано-воздушных смесей указанного состава вплоть до $p_0 = 0,03 \div 0,04$ МПа.

Турбулизация смеси при прочих равных условиях приводит к резкому возрастанию минимальной энергии воспламенения и сужению диапазона комбинаций токовременных характеристик разряда, способных воспламенить смесь. Типичный характер зависимости E_{\min} и τ_3 от пульсационной скорости u_{Σ} показан на рис. 4. Из него также следует, что путем оптимизации токовременных характеристик разряда значение E_{\min} турбулизированной смеси может быть мно-

гократно снижено (кривая 2). Подробнее влияние тока и размера межэлектродного зазора на минимальную энергию воспламенения и критическую длительность разряда иллюстрирует рис. 5. На нем обращает на себя внимание не только сужение области комбинаций характеристик разряда, при которых возможно воспламенение, но и еще более резкий рост, чем при ламинарных условиях, потребной для воспламенения длительности разряда в третьей фазе с ростом тока после его оптимального значения.

Хорошо видно также, что здесь в отличие от ламинарных условий воспламенения увеличение зазора лишь до определенных пределов играет положительную роль. Из рис. 5 следует, что при увеличении d от 1,0 до 2,5 мм минимальная энергия воспламенения снижается, а при дальнейшем его росте до 4,0 мм увеличивается. Это связано с тем, что по мере роста зазора условия поджигания улучшаются, главным образом, вследствие роста ее начального объема, который активизируется искрой, и уменьшения потерь тепла в электроды. С другой стороны, в условиях турбулентности с расширением зазора между электродами снижается устойчивость формирования начального очага, который, как показывает киносъемка, начинает размываться турбулентными пульсациями тем интенсивнее, чем больше d . При этом, естественно, увеличиваются и тепловые потери в окружающую смесь. Взаимная сбалансированность этих противоположных по характеру влияния факторов определяет оптимальный зазор.

Помимо размера межэлектродного зазора сильное дестабилизирующее действие на формирование начального очага горения в условиях турбулентности оказывает также чрезмерное форсирование искрового разряда по току. Кинограммы, снятые при интенсивной турбулизации смеси, показывают, что при повышении тока второй компоненты начавший формироваться очаг горения еще до окончания разряда отрывается от электродов, уносится вихрем и чаще всего гаснет на значительном удалении от места его формирования. В некоторых случаях (например, при 50%-ной вероятности воспламенения) этот очаг развивается в самораспространяющееся пламя на периферии видимой части камеры, а затем оттуда зона горения распространяется к ее центру. Для той же интенсивности турбулентности уменьшение тока второй компоненты до оптимального значения (при достаточно длительной третьей составляющей) приводит к тому, что начальный очаг горения, хотя и размывается хаотично вихрем, всегда остается в зоне межэлектродного зазора до

окончания действия третьей компоненты разряда и оттуда преобразуется в самораспространяющееся пламя.

Если неподвижные метано-воздушные смеси, даже околопредельных составов, характеризуются относительно стабильными величинами E_{min} при принятой форме разряда, то в условиях интенсивной турбулизации обеднение смеси приводит к значительному рассеиванию циклов значений минимальной энергии воспламенения. Особо отрицательное влияние на стабильность E_{min} в силу отмеченных выше причин оказывает чрезмерное увеличение тока разряда. Например, при $u_s = 9$ м/с между дисперсией значений E_{min} в отдельных циклах воспламенения и ростом тока выше I_{opt} отмечается практически пропорциональная зависимость. Оптимизация токовременных характеристик разряда повышает стабильность минимальной энергии.

Таким образом, варьируя динамику выделения энергии в искровом разряде, можно в значительной мере влиять на критические условия инициирования начального очага горения и в ламинарных, и в турбулизованных смесях. При значительных отклонениях от стехиометрических составов, особенно в случаях малых межэлектродных зазоров разрядника и пониженных давлениях, вполне логично требующих интенсификации инициирующего разряда, увеличение суммарной энергии искры при нерациональном выборе конкретных ее характеристик будет одновременно повышать и энергетический порог воспламенения. Естественно, что при этом надежность и вероятность воспламенения может не только не увеличиваться, но и снижаться в зависимости от того, насколько складывающийся уровень минимальной энергии воспламенения для данной комбинации характеристик разряда будет отличаться от общего количества выделившейся в нем энергии. Минимизация затрат энергии разряда на критический порог воспламенения, достигаемая согласованием характеристик разряда, позволяет создать и эффективнее реализовать избыток ее для более интенсивного развития начального очага и всего процесса горения в целом. Она также открывает возможности воспламенять при одинаковых затратах энергии более бедные смеси. Это тем более важно, что во многих случаях пределы энергетического форсирования искровых разрядов жестко ограничиваются рядом факторов, связанных с конструктивными возможностями системы зажигания и ее элементов, а также лимитами общего энергопотребления от источников питания.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. M. Boston, D. Bradley, F. K.-K. Lung e. a. 20-th Symp. (Intern.) Combustion. 1984.
2. J. F. Grant, E. P. Marram, M. E. Meilwain. Comb. Sci. and Technol., 1983, 30, 1—6, 174.
3. J. D. Dale, P. R. Smy, R. M. Clements. SAE Techn. Pap. Ser., N 780329, 1978.
4. M. Kono, S. Kumagai, T. Sakai. 16-th Symp. (Intern.) Combustion. 1976.
5. K. V. L. Rao, A. H. Lefebvre. Comb. Flame, 1976, 27, 1.
6. O. O. Akindede, D. Bradley, P. W. Mak e. a. Comb. Flame, 1982, 47, 129.
7. D. Bradley, I. L. Critchley. Comb. Flame, 1974, 22, 143.
8. B. Maly. 18-th Symp. (Intern.) Combustion. 1980.
9. H. Bertling, H. Schwarz. ATZ, 1978, 80, 4, 155.
10. Г. Н. Злотин, В. В. Малов, В. Флигел.— В кн.: Рабочие процессы в ДСВ. Волгоград, 1982.

Поступила в редакцию 11/VI 1985