

УДК 621.791.55

А. М. Савицкий, канд. техн. наук

М. М. Савицкий, д-р техн. наук

В. Н. Ващенко

Ю. Н. Шкрабалюк

И. А. Коровин

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины

(г. Киев, e-mail: sam@paton.kiev.ua)

УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРБИТАЛЬНОЙ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ ЗА СЧЕТ АКТИВАЦИИ ДУГИ

Приведены результаты исследования активации дуги при орбитальной сварке трубопроводов. Показано, что активация позволяет выполнять неповоротные стыки труб с толщиной стенки до 6 мм без разделки кромок за один проход, а при сварке более толстостенных труб обеспечивает толщину корневого прохода до 5 мм. Активация дуги резко снижает зависимость сварочного тока от пространственного положения сварочной ванны. Это упрощает технику сварки и удешевляет оборудование для ее реализации.

Наведені результати дослідження активації дуги при орбітальному зварюванні трубопроводів. Показано, що активація дуги дозволяє виконувати неповоротні стики труб з товщиною стінки до 6 мм без розробки кромок за один прохід, а при зварюванні більш товстостінних труб забезпечує товщину корневого проходу до 5 мм. Активація дуги різко знижує залежність зварювального струму від просторового положення зварювальної ванни. Це спрощує техніку зварювання і здешевлює обладнання для її реалізації.

Введение

Аргоно-дуговая сварка вольфрамовым электродом (TIG) является единственным из механизированных способов сварки открытой дугой, обеспечивающим высокое качество формирования сварных швов в различных пространственных положениях без применения специальных формирующих устройств. Это обуславливает ее широкое применение для сварки неповоротных стыков трубопроводов при строительстве, модернизации и ремонте атомных и тепловых электростанций, где технологические трубопроводы являются одной из основных составляющих оборудования станций. Трубопроводы АЭС и ТЭС по условиям эксплуатации и последствиям разрушения относятся к категории особоответственных конструкций. Поэтому к качеству швов при их монтаже предъявляются повышенные требования. Особенно это касается качества корневых швов многопроходных сварных соединений, из-за того что работоспособность, надежность и долговечность таких соединений в значительной мере определяется именно качеством корневого прохода.

Однако несмотря на все достоинства TIG-способ имеет существенный недостаток, заключающийся в низкой проплавающей способности дуги. Это является причиной того, что сварка металла толщиной более 2,5–3 мм выполняется с предварительной разделкой кромок в несколько проходов [1, 2], количество которых увеличивается по мере увеличения толщины свариваемого металла. Все это негативно отражается на производительности сварки и ее экономической эффективности.

В случае применения TIG-сварки для выполнения стыков трубопроводов орбитальным способом приходится дополнительно учитывать тот факт, что положение электрода в пространстве, при его движении вдоль стыка труб, постоянно изменяется. Соответствующим

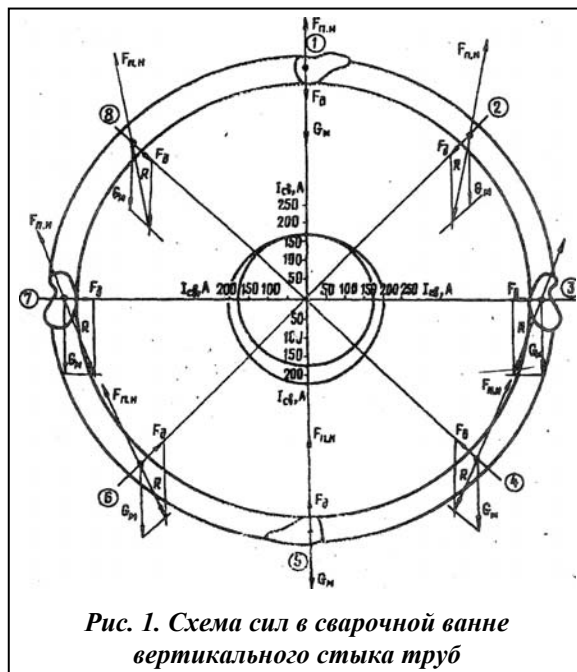


Рис. 1. Схема сил в сварочной ванне вертикального стыка труб

шим образом изменяется и пространственное положение сварочной ванны с жидким металлом (рис. 1). По этой причине толщина металла, свариваемого за один проход, как правило, не превышает 1,5–2 мм. Стык большей толщины необходимо сваривать с предварительной разделкой кромок многопроходными (многослойными) швами, а значительная масса трубопроводов ТЭС и АЭС имеет толщину стенки 3–6 мм. При этом между каждыми двумя последовательными проходами обязателен холостой пробег сварочного аппарата, для его возвращения в исходное положение и раскручивания рукавов с токопроводящим кабелем, кабелем управления, с газовой и охлаждающей коммуникациями.

Увеличение сварочного тока для повышения проплавливающей способности дуги приводит к ухудшению качества сварных соединений.

Формирование любого сварного шва происходит под действием трех основных сил: силы давления дуги на жидкий металл сварочной ванны ($F_{д.}$), силы поверхностного натяжения жидкого металла ($F_{п.н.}$) и гравитационной силы ($G_{м.}$).

В зависимости от взаимодействия и соотношения этих сил при одинаковых параметрах режима сварки могут быть получены швы различной формы и качества.

При орбитальной сварке взаимодействие и соотношения этих сил зависит от пространственного положения сварочной ванны (рис. 1). Гравитационная сила всегда направлена вниз и способствует вытеканию металла из ванны. Сила поверхностного натяжения металла всегда направлена на удержание его в сварочной ванне. Сила давления дуги в зависимости от пространственного положения электрода будет способствовать либо вытеканию металла из ванны (рис. 1, положение 1), либо удержанию его в ванне (рис. 1, положение 5). Таким образом, в процессе перемещения электрода сверху вниз (на спуск), от положения 1 в направлении положений 2, 3, 4, 5 сила давления дуги будет постепенно наращивать содействие силе поверхностного натяжения металла, а в процессе движения электрода на подъем, от положения 5 в направлении положений 6, 7, 8, 1, ослаблять это содействие, наращивая его по отношению к гравитационной силе. Это отрицательно сказывается на качестве формирования сварных швов и может привести к провисанию обратной стороны шва внутрь трубы в верхней части стыка или наружу – в нижней части стыка. Для улучшения условий и качества формирования швов на практике прибегают к изменению сварочного тока в зависимости от положения электрода в пространстве. Стык разбивают на сектора (рис. 1), как правило, не менее восьми. При сварке на спуск сварочный ток увеличивают, а на подъем уменьшают. Разница в токе в крайних положениях 1 и 5 (рис. 1) при традиционной TIG-сварке может достигать 30–40%.

За рубежом (Polysude (Франция), Esab (Швеция), Arc Machines (США), Kemppi (Финляндия) и др.) основным направлением решения этих проблем является повышение уровня автоматизации на базе использования мини-ЭВМ, программирующих систем, систем дистанционного слежения и управления процессом сварки. Это требует больших финансовых затрат как на стадии научных разработок, так и на стадии производства. Экономическая ситуация в Украине не позволяет в полном объеме использовать подобный путь решения проблемы. Поэтому для отечественной науки и производства более оптимальным является путь адаптации и использования передовых технологических решений, которые в свое время разрабатывались и применялись в других областях. Одной из таких разработок является

технология аргонодуговой сварки с активацией дуги специальными активирующими флюсами (АТИГ), которая широко и успешно применялась в ракетно- и авиастроении бывшего СССР.

С учетом изложенного целью данной работы является адаптация АТИГ-способа для решения проблем орбитальной сварки неплавящимся электродом.



Рис. 2. Влияние активирующих флюсов на глубину проплавления при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом

Основная часть

Результаты исследований влияния активирующих флюсов на глубину проплавления при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом свидетельствуют, что их применение способствует увеличению глубины проплавления в 2–3 раза (рис. 2) по сравнению с традиционным способом. Это позволяет сваривать стали толщиной до 10–12 мм за один проход с полным проплавлением без разделки кромок (рис. 3). Формирование сварного шва осуществляется без применения формирующих подкладок. Но эти результаты достижимы при сварке швов в определенном фиксированном пространственном положении.



Рис. 3. Сварное соединение толщиной 10 мм, выполненное с активирующим флюсом за один проход без разделки кромок

При орбитальной сварке, как показывают результаты экспериментов, толщина металла, которую можно сваривать за один проход, уменьшается до 6 мм. Причиной является постоянное изменение пространственного положения электрода и баланса сил, действующих на жидкий металл сварочной ванны.

Применение специальной техники сварки и определенная подготовка торцов труб позволяет выполнять за один проход неповоротные стыки с толщиной стенки до 8 мм. Но это на сегодняшний день максимальная толщина стыка, которая может быть сварена орбитальной сваркой с активирующим флюсом за один проход. При большей толщине стыка необходима разделка кромок. Стык сваривается за несколько проходов. Первый проход □ корневой, толщиной до 5 мм, выполняется с активирующим флюсом без присадочной проволоки, остальные – заполняющие, традиционным способом с присадочной проволокой либо плавящимся электродом в защитных газах.

Преимуществом активирующих флюсов при орбитальной сварке является также и то, что они резко ослабляют влияние пространственного положения электрода и сварочной ванны на сварочный ток. Изменение сварочного тока в зависимости от положения электрода при толщине стенки трубы 6 мм не превышают 6% (табл. 1). При меньших толщинах стенок свариваемых труб изменения сварочного тока еще меньше.

Обсуждение результатов

Активирующие флюсы позволяют сваривать металл толщиной до 10–12 мм за один проход без разделки кромок. Если металл аналогичной толщины сваривать традиционным аргонодуговым способом с разделкой кромок, то для этого необходимо не менее 10–15 проходов. Специфическая, расширяющаяся книзу форма проплавления при АТИГ-способе, способствует формированию в металле шва дезориентированной структуры (рис. 4), которая повышает его трещиностойкость.

Все сказанное выше свидетельствует, что АТИГ-способ не только увеличивает производительность аргонодуговой сварки, но и повышает качество сварных швов.

Таблица 1. Изменение сварочного тока при орбитальной сварке неповоротного стыка труб с применением активирующего флюса

Толщина стыка, мм	Пространственная ориентация электрода, град.	$V_{св}$, м/час	I , А
6	0–45	6	175
	45–90	6	175
	90–135	6	185
	135–180	6	185
	180–225	6	180
	225–270	6	180
	270–315	6	175
	315–360	6	175

Однако в случае применения АТИГ-способа для орбитальной сварки толщина металла, свариваемого за один проход, уменьшается до 6 мм (рис. 5). Причиной является постоянно изменяющееся пространственное положение сварочной ванны. Поэтому для того, чтобы надежно удерживать в ней жидкий металл, приходится постоянно корректировать и поддерживать баланс сил, действующих на него в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1. Увеличение толщины металла, свариваемого за один проход, требует увеличения сварочного тока, вследствие этого увеличивается масса жидкого металла в ванне и, следовательно, гравитационная сила. Баланс сил нарушается, что приводит к вытеканию металла из ванны.

На основе применения активирующих флюсов разработана специальная техника сварки, позволяющая за один проход выполнять неповоротные стыки трубопроводов с толщиной стенки до 8 мм. Но для ее реализации необходимо специальное оборудование и специальная подготовка кромок.



Рис. 4. Дезориентированная мелкокристаллическая структура сварного шва, выполненного АТИГ-



Рис. 5. Неповоротный стык трубопровода диаметром 76мм с толщиной стенки 6 мм, выполненный АТИГ-способом

Если толщина стенки трубы превышает 6 мм, сварка трубопроводов выполняется многопроходными (многослойными) швами с предварительной узкой разделкой кромок (рис. 6), форма которой приведена на рис. 6, а. Первым выполняется корневой проход толщиной до 4,5–5 мм с активирующим флюсом без присадочной проволоки (рис. 6, б). Последующие – заполняющие проходы выполняются традиционной аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом с присадочной проволокой или плавящимся электродом в защитных газах.

Применение активирующего флюса при сварке корневого прохода обеспечивает его толщину в 2–2,5 раза больше, чем это достижимо для традиционного способа, что, в последующем, при заполнении разделки полностью предотвращает опасность его прожога. Сравнение толщины стыка, выполняемого однопроходным швом и толщины корневого прохода, выполняемых с активирующим флюсом, свидетельствует, что в первом случае сваривается толщина 6 мм, а во втором – 4,5–5 мм. Это связано с тем, что по мере увеличения толщины стенки трубы отвод тепла из сварочной ванны в основной металл усиливается. Сохранение глубины проплавления на уровне 6 мм требует повышения сварочного тока, что, в свою очередь, сопровождается увеличением объема и массы расплавленного металла в сварочной ванне и увеличением гравитационной силы. Баланс сил (рис. 1) нарушается, что приводит к ухудшению качества формирования шва. Кроме этого, по мере увеличения диаметра труб увеличивается и овальность труб, которая заметно проявляется



при диаметрах более 200 мм. Это приводит к тому, что трубы могут стыковаться с некоторым смещением кромок, которое достигает 1,5 мм. С учетом такого смещения толщина приотупления кромок не должна превышать 4,5 мм. В этом случае обеспечивается качественное формирование корневого прохода.

Существенным преимуществом АТИГ-способа является то, что он позволяет, в большинстве случаев, исправлять дефектные участки шва без их разделки. Достаточно переплавить эти участки с применением активирующего флюса.

Результаты исследований показали, что резкое снижение зависимости сварочного тока от пространственного положения сварочной ванны, которое обеспечивается активирующим флюсом, позволяет существенно упростить технику выполнения неповоротных стыков и оборудование для их выполнения.

Выше было сказано, что для оптимизации условий формирования швов при орбитальной сварке прибегают к изменению сварочного тока в зависимости от положения электрода в пространстве. Данная техника выполнения неповоротного стыка требует применения оборудования, оснащенного системами программирования, контроля и корректировки параметров режима на базе мини-ЭВМ. Стоимость таких сварочных комплексов не менее 100000 €.

Сварочный ток является одним из составляющих более общего параметра процесса сварки – погонной энергии, которая характеризует тепловложение в сварное соединение в процессе его выполнения. Любое изменение сварочного тока влечет за собой изменение погонной энергии. Она определяется как [3]

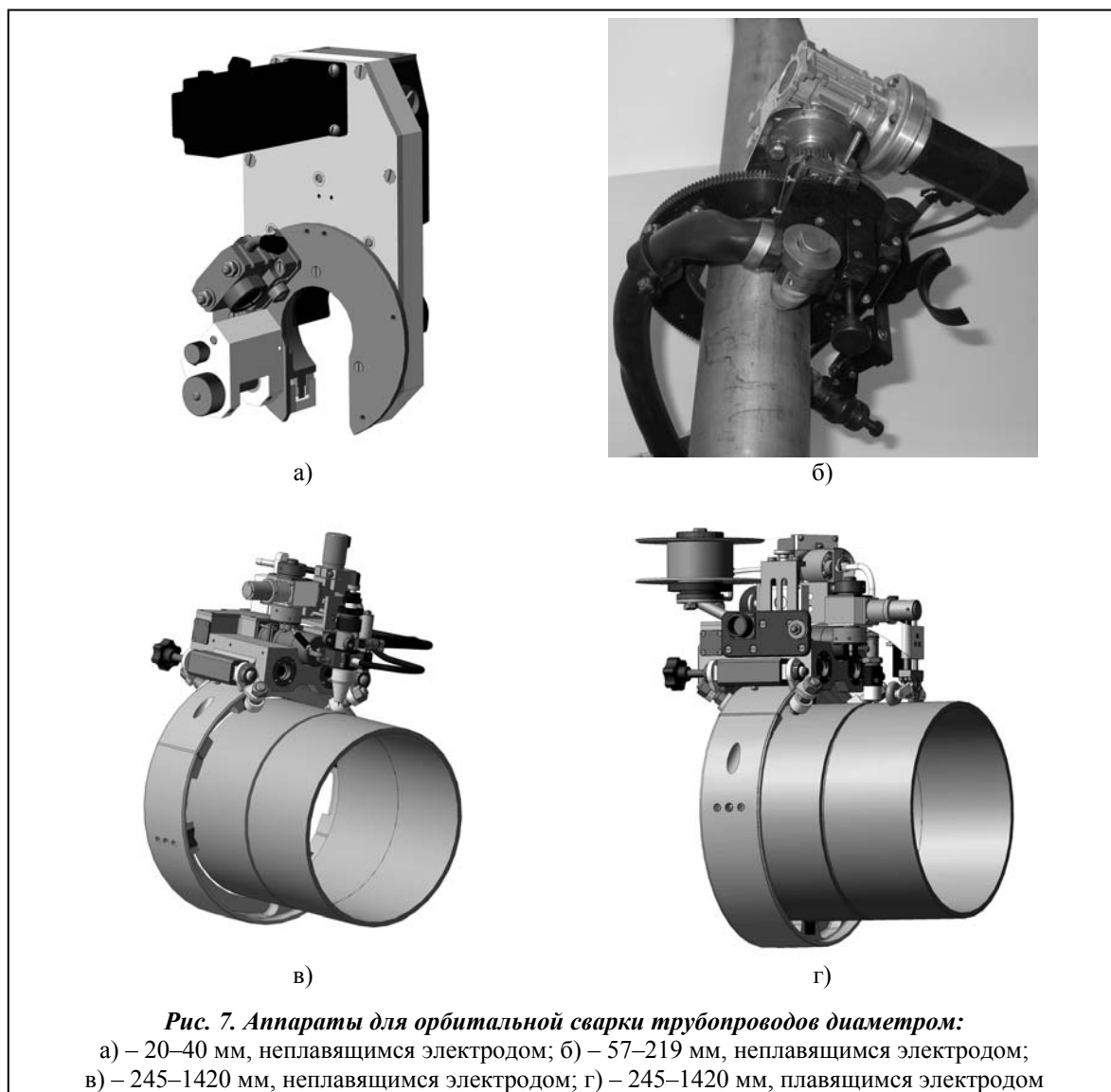
$$\frac{q}{V} = \frac{\eta IU}{V}, \quad (1)$$

где: q – тепловая мощность дуги; η – КПД дуги; I – сварочный ток; U – напряжение на дуге; V – скорость сварки.

Следовательно, регулировать погонную энергию можно, изменяя I или V . Регулировка погонной энергии сварки за счет изменения напряжения дуги предельно ограничена, а КПД дуги для каждого способа сварки изменяется в очень узких пределах.

Активирующий флюс резко ослабляет зависимость тока и погонной энергии сварки от пространственного положения сварочной ванны. Поэтому, как показали результаты исследований, регулировку погонной энергии можно осуществлять за счет изменения скорости сварки. При сварке на спуск скорость уменьшается, а при сварке на подъем – увеличивается. Реализация данной техники не представляет серьезных проблем, так как в настоящее время серийно выпускаются относительно недорогие сервоприводы с уже заложенной в них функцией программирования скорости вращения электродвигателя. Это позволяет значительно упростить и удешевить оборудование орбитальной сварки труб.

На основе указанных сервоприводов разработан ряд аппаратов с программным управлением для орбитальной сварки (рис. 7) с применением активирующих флюсов неповоротных стыков трубопроводов диаметром: 20–40; 57–219; 245–1420 мм. В зависимости от



конкретных требований программы могут быть разного уровня сложности. Простейшая программа предусматривает перемещение аппарата вдоль свариваемого стыка с постоянной скоростью и его автоматическую остановку после выполнения стыка. Программы более сложного уровня предусматривают комплекс многоходовых операций, например: автоматическое нанесение активирующего флюса, выход в исходное для сварки положение, сварку с постоянной или переменной, в зависимости от положения электрода в пространстве, скоростью и другие возможности. Стоимость оборудования, в зависимости от комплектации и уровня сложности программ, в 2–7 раз дешевле аналогичного импортного.

Для труб диаметром 57–219 мм разработан комплекс механического оборудования для подготовки и сборки стыков под сварку (рис. 8).

Результаты механических испытаний сварных соединений, выполненных с применением активирующих флюсов, свидетельствуют об их высоком качестве (табл. 2). Они не уступают сварным соединениям, выполненным традиционным TIG-способом, либо по ряду показателей, превосходят их.

Применение активирующих флюсов на Курской и Смоленской АЭС для орбитальной сварки технологических трубопроводов в условиях монтажа засвидетельствовало перспективность данного способа. Было сварено 6000 стыков.

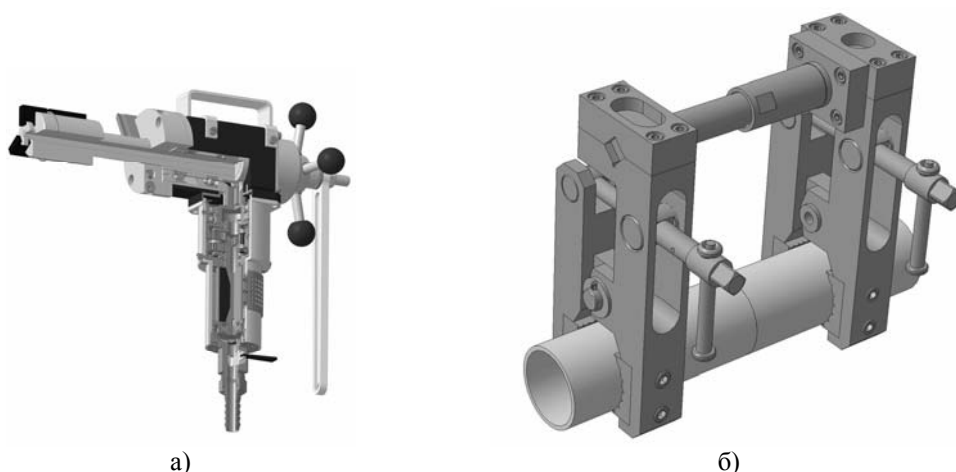


Рис. 8. Механическое оборудование для подготовки и сборки под сварку стыков труб диаметром 57□219 мм:

а) – устройство для торцовки труб и подготовки кромок;
 б) – устройство для сборки и центрирования стыка труб под сварку

Таблица 2. Механические свойства сварных соединений стыков трубопроводов, выполненных орбитальной TIG и ATIG сваркой

Марка стали	Способ сварки	σ_b , МПа	σ_T , МПа	Ψ , %	δ , %	KCU, Дж/см ²	KCV, Дж/см ²	Угол загиба, град
сталь 20	TIG	470,0	340,0	67,0	18,5	105	64	180 (трещин нет)
	ATIG	499,3	388,3	67,9	22,3	116	78	180 (трещин нет)
08X18H10T	TIG	537	335	64,0	42,7	165	–	180 (трещин нет)
	ATIG	560	312	64,1	48,3	190	–	180 (трещин нет)
12X18H10T	TIG	543	346	68,5	44,5	175	–	–
	ATIG	565	345	69,0	49,3	170	–	–

Выводы

1. Результаты проведенных исследований и опыт применения активирующих флюсов при орбитальной сварке трубопроводов, в частности, в ядерной энергетике свидетельствует, что активация дуги позволяет существенно расширить технологические возможности орбитальной сварки.

2. Активирующие флюсы позволяют увеличить производительность орбитальной сварки при одновременном повышении качества сварных соединений, упростить технику выполнения неповоротных стыков трубопроводов и существенно удешевить сварочное оборудование для ее реализации.

3. Перспективой в данном направлении является разработка активирующих флюсов для сварки плавящимся электродом (AMIG-способ) и применение их при орбитальной сварке трубопроводов различного назначения, т.к. сварка плавящимся электродом в несколько раз производительнее сварки неплавящимся.

Литература

- ГОСТ 14771-76 взамен ГОСТ 14771-69 Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. – 1969. – 37 с.
- Патон Б. Е. Технология электрической сварки плавлением/ Б. Е. Патон. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
- Рыкалин Н. Н. Тепловые процессы при сварке плавлением / Н. Н. Рыкалин, А. И. Пугин. – М.: Профиздат, 1959. – 96 с.

Поступила в редакцию
14.03.12