

ОБОГАЩЕНИЕ УГЛЕЙ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

И.О. Усольцева, Ю.В. Передерин, Р.И. Крайденко

В статье представлено современное состояние технологий по обогащению угля. Показаны технологии, применяемые в России и за рубежом. Рассмотрены мокрые методы, которые основаны на гравитации и флотации, и сухие, которые подразумевают использование аэросуспензий, для тех стран и регионов, где остро ощущается нехватка воды. Приведены примеры применения новых технологий на предприятиях. Обзор по способам обогащения углей выявил, что требуется разработка новых реагентов и оптимизация применяемого оборудования для повышения качества угольного сырья. Методы исследования включали в себя все доступные источники информации: патентные базы РФ, США, ЕВРОСОЮЗА, а также электронные источники Scopus, PИИЦ, Web of Science. Так же приведена оценка использования угля в России, выявившая, что уголь преимущественно экспортируется, что свидетельствует о недостаточности использования данного вида сырьевых запасов на внутреннем рынке энергетических источников. Приведено сравнение технологий, используемых в различных климатических зонах, а также отличающихся по содержания коммерциализуемого угля в исходном минеральном сырье. Показано, что высокоперспективная технология «СЕПАИР®» обладает максимальной эффективностью по сравнению с аналогами по параметру извлекаемости целевого минерального компонента.

Ключевые слова: Обогащение, уголь, сухие методы, мокрые методы, сепарация, гравитационные методы, флотация, углеперерабатывающие предприятия.

В структуре мирового потребления топливно-энергетических ресурсов доля угля составляет 29 %. Основной центр потребления угольной продукции находится в Китае – 3,8 млрд. т (или 49 % от общего потребления угля) и Индии – 0,95 млрд. т (или 12 %).

Среди других крупнейших потребителей угля можно выделить США – 0,8 млрд. т (10 %) и Евросоюз – 0,73 млрд. т (более 9 %).

Уголь используется в качестве сырья для получения жидкого и газообразного топлива, в связи с чем его потребление растет с каждым годом, но еще быстрее потребляются газ и нефть (рисунок 1).

Необычно быстрое увеличение потребления жидкого топлива объясняется его преимуществом: удобством сжигания, высокой калорийностью, транспортабельностью, полнотой сгорания. Добываемый уголь во многих случаях не отвечает требованиям потребителей по основным качественным показателям: зольности, влажности, теплотворной способности и спекающим свойствам. Повышение качества угольного сырья на современном этапе возможно только с применением методов обогащения, которые позволяют получать высококачественные коксующиеся и энергетические угли, востребованные как на внутреннем, так и на внешнем рынках [1].



Рисунок 1 – Использование угля в России

МОКРЫЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ

В настоящее время на углеобогатительных фабриках используются гравитационные и флотационные методы обогащения [2].

Для применения флотации и улучшения ее качества обогащения необходимо подобрать реагент. На данном этапе науки идет поиск и разработка специфических реагентов.

Эффективность флотационного обогащения зависит не только от аппаратного

оформления, но и от применяемых флотационных реагентов. Несмотря на то, что уголь относится к неполярным минералам с высокой естественной гидрофобностью, для его эффективного флотационного обогащения необходимо использование флотореагентов – собирателей, пенообразователей, либо комплексных флотореагентов. В настоящее время в России при обогащении углей методом флотации в качестве реагентов используются полупродукты нефтепереработки и отходы нефтехимии. В большинстве случаев в качестве собирателей при флотации углей используются аполярные реагенты: керосин, дизельное топливо, топливо ТС-1, термогазойль.

В качестве пенообразователей – гетерополярные: КОБС (кубовые остатки производства бутилового спирта), КЭТГОЛ (кубовые остатки от производства 2-этилгексанола), Т-80 (полупродукт, образующийся при получении 1,3-диоксана), ВПП (полупродукт, образующийся при производстве 4,4-диметил-1,3-диоксана) [3].

Так, ООО «Минерал» (Группа компаний «Маррико») внедряет новые флотореагенты Unico™ марок «С» и «F» на спиртовой основе для флотации угольных шламов. Флотореагент Unico™ марки «С» обладает более выраженным свойством собирателя. Флотореагент Unico™ марки «F» обладает более выраженным свойством вспенивателя. При совместном использовании флотореагентов Unico™ марок «С» и «F» достигается выраженный синергетический эффект. Флотореагенты Unico™ флотируют все известные виды углей: газовые, жирные, коксовые, тощие, а также антрациты, образуют стабильную пену, которая хорошо обезвоживается. Действуют селективно во всем спектре размеров частиц в пульпе [3].

Возможно использовать в качестве реагента-собирателя γ -гексилтиопропиловый эфира фенола. Технический результат – повышение извлечения горючей массы в концентрат при одновременном снижении расхода реагента [4].

В статье Гиззатова А.А. «Эффективные реагенты для флотации высокозольных углей печорской центральной обогатительной фабрики» были рассмотрены вопросы по разработке эффективных реагентов для флотации труднообогатимого и высокозольного угля с высоким содержанием фюзеновых элементов. Разработанные реагенты удовлетворяют требованиям технологического процесса, повышают скорость флотации, обеспечивая производство качественных концентратов, безопасность флотационного процесса и не

уступают зарубежным аналогам [5].

Способом обогащения угля занимались Предтечинский М.Р. и Пуховой М.В. В своем патенте авторы исследования проводили смешивание исходного угольного сырья и воды с получением водной суспензии с последующим введением в нее агломерирующего агента, разделение и выделение углесодержащего компонента путем флотации [6].

Следует выделить метод, получивший название «турбулентная микрофлотация», или «ТМФ-технология». Результаты пилотных испытаний турбулентной микрофлотации при обогащении тонкодисперсных угольных суспензий на ОФ Свято-Варваринская (Украина) свидетельствуют об относительной эффективности метода. Известны схема и оборудование фирмы Iris (США) для микрофлотации углей в промышленных масштабах на колоннах большого диаметра. Известны работы по применению вакуумной флотации, электрофлотации, флотации с носителем, где в роли носителя применяются более крупные частицы. На ОФ «Распадская» (Южный Кузбасс, г. Междуреченск) была решена проблема экономического обогащения угольных шламов до «нуля» применением нового для углеобогащения метода избирательного осаждения угольных частиц с помощью метода их селективной флокуляции. Себестоимость обогащения угольных шламов способом избирательного осаждения угля и обезвоживание продуктов в 2-3 раза ниже, чем при флотации угля [7].

Институтом «Сибниуглеобогащение» разработаны технологические схемы для обогащения коксующихся и энергетических марок углей, предусматривающие оборудование для флотации, обезвоживания и сгущения шламов, позволяющее получить высококачественные продукты обогащения с минимальной влагой, не требующие термической сушки.

Это флотационные машины пневматического типа «Пневмофлот» и механического – «Флотомодерн», патронные фильтры под давлением 6ПТК-10 для обезвоживания концентрата флотации и шламов, новые флотационные реагенты и флокулянты, современные дозаторы реагентов, пеногасители, радиальные сгустители, укрытые склады готовой продукции и др. Флотационные машины, патронный фильтр под давлением прошли испытания на обогатительных фабриках Кузнецкого бассейна.

Обратное флотирование в обогащении лигнита Муш-Эльмакая. В этом исследовании, чтобы удалить серу и золу из лигнита, был применен метод обратной флотации. Были исследованы эффекты времени измельчения,

концентрации твердого вещества, рН, количества коллектора, количества депрессора и количества пенообразователя на обратной флотации [10].

Флотация StackCell™ – новая технология для тонкого извлечения угля. В течение последнего десятилетия колоночные флотационные камеры стали широко использоваться для модернизации тонкодисперсных угольных потоков.

Новая высокопроизводительная технология флотации, называемая StackCell™, была разработана как альтернатива как традиционным, так и колонным флотационным машинам (рисунок 2).

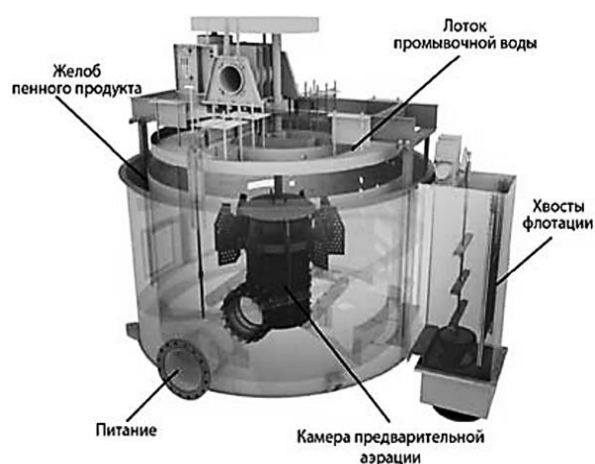


Рисунок 2 – Схема Eriez StackCell™

Технология использует предварительную аэрацию и камеру с высокой сдвиговой аэрацией, которая обеспечивает эффективное контактирование с пузырьковыми частицами, тем самым существенно сокращая время пребывания, необходимое для флотации угля [11].

Проведенный анализ современных методов обогащения углей показал, что в условиях действующих и вновь строящихся углеобогащительных фабрик повысить эффективность обогащения можно, в частности, с помощью интенсификации процесса флотации. Основными направлениями в данной области могут служить поиски селективных флотационных реагентов и разработка на их основе новых реагентных режимов, которые позволят повысить технико-экономические показатели процесса.

СУХИЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ

В патенте Люленков В.И. и др. был разработан способ переработки рядового угля, вклю-

чающий процесс его избирательного дробления, предварительное разделение на низкосольные и высокосольные классы. После предварительного выделения на грохотах угля с пониженным содержанием золы его подвергают разделению по крупности и плотности на высокосольные и низкосольные классы с помощью струйного пневмоклассификатора с последующей отгрузкой низкосольного угля (концентрата) потребителю. Далее по одному из вариантов оставшиеся более высокосольные классы смешивают с продуктом с высоким содержанием золы, полученным после предварительного грохочения, и подвергают избирательному дроблению, после чего разделяют его по крупности и плотности с помощью струйного пневмоклассификатора на низкосольный уголь (концентрат), отправляемый потребителю, и высокосольный продукт, отправляемый в отвал.

Другой вариант: высокосольные классы, оставшиеся после пневмоклассификации и после предварительного разделения на грохоте, подвергают разделению избирательному дроблению и последующему разделению по крупности и плотности на струйном пневмоклассификаторе с отправкой низкосольного продукта потребителю, а высокосольного продукта – в отвал [12].

Разработкой комбинированного метода занимались А.В. Кузимин, Д.Ю. Бойко и В.А. Адов в своей статье «Разработка комбинированной технологии сухого обогащения угля» провели исследование оптимальных параметров процесса пневматической сепарации [13].

Рассмотрена технология сухого обогащения угля от Корейского института геологии и минеральных ресурсов. Они предлагают "Сухой" способ обогащения угля.

Извлекаемая на поверхность масса сперва мелется (измельчается) в специальных аппаратах-грохотах, после чего измельченная порода подвергается сильному воздействию направленной воздушной струи (пневматический метод) или сортируется на специальных вибростендах, в процессе чего очищенный уголь собирается с одной стороны, а примеси – с другой (Установка KAT-Table) [14].

ДРУГИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ

Сепарация в интенсивном или сильном магнитном поле – это новые области для исследования. Разработки проводятся в «Сала Магнетикс» (Кембридж, Массачусетс) и Национальной лаборатории (Окридж, Теннесси, США). Обе организации используют магнитные сепараторы «Сала». В Кембридже используют влажную систему суспензии, в то

время как в Окридже используют сухую [15].

Подробнее остановимся на методе пред-варительного сухого обогащения, предложенном южноафриканской компанией Osborn Engineered Products.

Типовая схема процесса сухого обогащения угля выглядит следующим образом. Обычно цикл переработки начинается с того, что уголь из самосвала перегружается в приемный бункер обогатительного комплекса. Здесь негабаритные куски измельчаются с помощью гидромолота ВТИ (Astec Industries Inc.), как правило, стационарно установленные с манипулятором на опорной стойке. Радиус охвата гидромолота должен быть достаточным, чтобы раздробить негабарит, лежащий в любой точке колосниковой решетки приемного бункера дробилки. Обычно под приемным бункером размещается пластинчатый питатель повышенной прочности. Osborn выпускает пластинчатые питатели шириной от 900 до 3500 мм. Далее через колосниковый вибрационный питатель материал поступает в Щековую дробилку. После отсева скальной породы, уголь подается либо угольную мельницу, либо в валковую дробилку [16].

На новосибирском предприятии «Гормашэкспорт» разработана, внедрена в серийное производство и доведена до коммерческого использования установка «СЕПАИР®» (рисунок 3). Принципиально новая технология обогащения угля, другого минерального и техногенного сырья, а также коммунально-бытовых отходов.

В настоящее время эта технология является уникальной в своей области и не имеет аналогов в мире. На сегодняшний день ни один из существующих технологических комплексов не способен показать более высокие результаты, чем установка «СЕПАИР®». Основной принцип технологии состоит в разделении продуктов по плотности в восходящем потоке воздуха в вихревой камере- расположенной над перфорированным полотном.

Разработчик выделяет следующие преимущества данной технологии:

- высокая эффективность;
- возможность получения на одном комплексе нескольких продуктов различной плотности;
- возможность работы при отрицательных температурах (до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- возможность плавного регулирования плотности (зольности) получаемых продуктов без остановки технологического процесса;
- отсутствие потребления воды;
- отсутствие необходимости сушки продуктов обогащения;

- сухое складирование отходов обогащения, в т. ч. шламов;
- низкая стоимость процесса обогащения;
- возможность работы комплекса под открытым небом;
- возможность обогащения влажного продукта;
- возможность создания мобильных комплексов.



Рисунок 3 – Внешний вид функционирующего комплекса

Обязательной стадией обработки исходного материала является измельчение на запатентованной установке для получения частиц необходимого размера. Далее в воздушном потоке (в циклонах) идет классификация частиц: происходит отделение тонких пылей и низкоплотных частиц примесей. Изменение скорости потока является элементом настройки оборудования: подбираются режимы по массе уносимых с воздушным потоком частиц.

Принцип разделения продуктов по плотности в восходящем потоке воздуха, создаваемом в сопле, которое расположено над перфорированным полотном. Высокая эффективность процесса обеспечивается тем, что во время сепарации происходит не разделение всей горной массы единым потоком, а обеспечивается двухстадийное разделение по заданной границе плотности для каждого отдельно взятого зерна перерабатываемого материала. Реализация процесса заключается в следующем.

Обогащаемый материал размещается на движущейся сетке. Толщина слоя зависит от крупности перерабатываемого материала и может быть кратна 1-5 размеру максимального куска материала (1 – для продуктов с крупностью от 20 до 100 мм, 3-5 – для продуктов с крупностью до 10 мм). Над сеткой расположены всасывающие сопла, в которых создается вертикальный поток воздуха. Материал, движущийся по сетке, поступает в зону под

соплом, где на него начинает действовать вертикальная аэродинамическая сила. Если плотность материала значительно превышает плотность, по которой происходит разделение продуктов, то материал остается на ленте и удаляется из зоны сепарации. Если материал имеет плотность меньше или близкую к плотности разделения, то он за счет аэродинамической силы поднимается в сопло. В сопле накапливается взвешенный слой, состоящий из частиц, имеющих плотность, равную плотности разделения. Частицы, имеющие плотность меньше плотности разделения, проходят вертикально вверх через взвешенный слой и воздухом удаляются из процесса. Более тяжелые частицы возвращаются на ленту и так же удаляются из процесса за счет движения ленты. Плотность, по которой происходит разделение в сопле, регулируется за счет геометрических параметров сопла и аэродинамических характеристик восходящего потока.

При необходимости разделения продукта на несколько классов различной плотности процесс повторяют нужное количество раз (над сеткой устанавливают несколько сопел).

Повторяемость процесса подтверждена десятками тысяч экспериментов, проведенных на лабораторной установке в период создания технологии. К настоящему времени проведены тестовые испытания сырья десятков месторождений на пилотной установке «СЕПАИР®» в Новосибирске. Получены результаты эксплуатации промышленной установки.

Установка позволяет производить разделение исходного материала на продукты, различающиеся друг от друга по плотности на 0,01-0,1 г/см³. Изменение границ плотности можно плавно осуществлять в процессе работы установки без ее остановки.

В одной установке возможно получение любого количества продуктов различной плотности. Например, в случае необходимости возможно разделение руды на 4-12 фракций различной плотности, а соответственно и химического и минералогического состава.

В настоящее время разработаны модели сепаратора, обеспечивающие разделение исходного продукта на 2, 3, 4 и 5 различных продуктов.

Исследования процессов обогащения различных видов руд показали, что метод применим как для предварительного обогащения руд цветных металлов и золота, так и для обогащения концентратов при доводочных операциях.

Использование технологии «СЕПАИР®»

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3 2017

для предварительного обогащения руд позволяет существенно снизить затраты на обогащение за счет сокращения объема руды, поступающей на измельчение.

Такой принцип обогащения позволяет разделять частички с низким градиентом плотности. Стоимость обогащения 1 т угля по такой технологии составляет 25-30 рублей, по существующим способам – 60-150 руб./т (при мощности 1,2-6 млн. т/год). Мощность (максимальная внедренная) составляет 240 кВт при производительности до 220 т/ч по исходному сырью [17].

В настоящее время компания «SUN Energy» совместно с российскими партнёрами применяет в ТЭС уникальную технологию сухого обогащения угля. В данном методе применяется система центрифуг, обрабатывающих поступающий уголь и повышающих уровень зольности в топливе. В данной системе пресная вода используется как вспомогательный охлаждающий материал для технологии обогащения, что значительно снижает уровень её потребления. Кроме того, сухое обогащение значительно технологически безопаснее для персонала, не наносит вред окружающей среде и не уступает в эффективности мокрому методу обогащения при сниженной себестоимости. В итоге это позволяет сократить расход пресной воды, поднять энергоёмкость топлива и снизить итоговую себестоимость обогащённого угля [18].

Необходимость в интенсивном развитии техники и технологий обогащения углей определяется совокупным действием целого ряда объективных факторов, прежде всего, повышением требований со стороны потребляющих отраслей к качеству угольной продукции.

На основе проведенных исследований можно сделать вывод о том, что технологии обогащения углей требуют разработки новых реагентов и оптимизации применяемого оборудования для повышения качества угольного сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беловолов, В. В. Техника и технология обогащения углей: справочное руководство [Текст] / В. В. Беловолов, Ю. Н. Бочков, М. В. Давыдов и др.; под общ. ред. В. А. Чантурия, А. Р. Молявко – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Наука, 1995. – 622 с.
2. Крайденко Р.И., Передерин Ю.В. и др. / Технология добычи вольфрама: современное состояние технологий // журнал «Ползуновский вестник» – 2015. – №4. Т.2 – с. 135-139.
3. Гайнуллин И.К. / Повышение эффективности процесса флотации угольных шламов с использо-

ванием флотореагентов Unico™ // Научно-технический журнал «Уголь» - 2013. – № 5. – С. 105–106.

4. Способы флотации угля [Текст]: пат. 2457905 Рос. Федерация: МПК В 03 D 1/00 / Петухов В.Н.; заявитель и патентообладатель Уфим. гос. нефт. тех. ун-т. – № 2010142495/03; заявл. 18.10.2010; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 22. – 6 с.

5. Гизатова А.А. // Эффективные реагенты для флотации высокозольных углей печорской центральной обогатительной фабрики: [Электронный ресурс] Научный журнал «Нефтегазовое дело». -2014. - №5. <http://ogbus.ru/article/effektivnye-reagenty-dlya-flotacii-vysokozolnyx-ugley-pechorskoj-centralnoj-obogatitelnoj-fabriki/>

6. Способ обогащения угля и устройство для его осуществления [Текст]: пат. 2264263 Рос. Федерация: МПК В 03 В 1/02, 7/00 / Предтеченский М.Р., Пуховой М.В., Гайслер Е.В.; заявитель и патентообладатель ООО «Междунар. Науч. центр по теплофизике и энергетике. – № 2004115828/03; заявл. 24.05.2004, Бюл. № 32. – 9 с.

7. Новак В.И., Козлов В.А. // Обзор современных способов обогащения угольных шламов: [Электронный ресурс] Научно-технический журнал ГИАБ. – 2012. – № 6. <http://www.giab-online.ru/catalog/10600>.

8. Антипенко Л. А. / К вопросу о современных технологиях переработки и обогащения угля // Научно-технический журнал «Уголь» - 2015. - №12 – с. 68-71

9. Zhang H., Liu Q. / Lignite cleaning in NaCl solutions by a reverse flotation technique // Physicochemical Problems of Mineral Processing 51(2) – 2015. – P. 695–706.

10. Öztürk F. D., H. Abakay Temel / Reverse Flotation in Muş-Elmakaya Lignite Beneficiation // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects – 2013. – № 8. – P. 695-705.

11. Michael Kiser, Robert Bratton, Gerald Luttrell // StackCell™ Flotation – A New Technology for Fine Coal Recovery: [Электронный ресурс]. <https://www.eriezflotation.com/pdfs/EFD%20SME-PCMIA%20Paper%20Stack%20Cell%202012%20316.pdf>

12. Способ сухого обогащения рядового угля [Текст]: пат. 2268787 Рос. Федерация: МПК В 07 В 9/00 / Люленков В.И., Кузьмин А.В., Качуров К.В., Кардаков А.Л., Бойко Д.Ю.; заявитель и патентообладатель Люленков В.И., Кузьмин А.В., Качуров К.В., Кардаков А.Л., Бойко Д.Ю. – № 2005113613/03; заявл. 05.05.2005; опубл. 27.01.2006, Бюл. № 03. – 9 с.

13. Кузьмин А. В., Бойко Д. Ю., Адов В. А. / Раз-

работка комбинированной технологии сухого обогащения угля // ГИАБ. – 2009. Т. 15. – № 12. – С. 507–516.

14. Технология сухого обогащения угля от Корейского института геологии и минеральных ресурсов(KIGAM). [Электронный ресурс] Электрон. дан. – 2015. URL: <http://natd.gov.kz/wp-content/uploads/2015/08/Obzor-1.pdf>, свободный. – Яз. Рус. Дата обращения: 25.04.2017.

15. Оборудование для обогащения угля. Электронная статья. [Электронный ресурс] Электрон. дан. – 2015. URL: <http://www.china-bridge.ru/oborudovanie-dlya-obogashheniya-uglya/>, свободный. – Яз.Рус. Дата обращения: 1.05.2017.

16. Технология сухого обогащения угля от компании Osborn (ЮАР). Электронная статья. [Электронный ресурс] Электрон. дан. URL: <http://mining-media.ru/ru/article/obogach/684-tehnologiy-sukhogo-obogashcheniya-uglya-ot-kompanii-osborn-yuar>, свободный. – Яз. Рус. Дата обращения: 20.05.2017.

17. Сухое обогащение - комплекс пневматической сепарации «СЕПАИР®». Электронная статья. [Электронный ресурс] Электрон. дан. URL: <http://gmexp.ru/netcat/files/340/531/4cea1ac90c68d791b7c8e24172892507>, свободный. – Яз. Рус. Дата обращения: 25.05.2017.

18. Технологии обогащения топлива. Электронная статья. [Электронный ресурс] Электрон. дан. URL: <http://iqtec.pro/ru/projects-2/thermal-electric-stations/fuel-enrichment>, свободный. – Яз. Рус. Дата обращения: 06.06.2017.

Усольцева Ирина Олеговна, аспирант, Кафедра химической технологии редких, рассеянных и радиоактивных элементов, НИ ТПУ, 634028, г. Томск, ул. Ленина,2, e-mail: supa57@yandex.ru, тел: 89521759105.

Передерин Юрий Владимирович, к.т.н., Старший преподаватель, Кафедра химической технологии редких, рассеянных и радиоактивных элементов, НИ ТПУ, 634028, г. Томск, ул. Ленина,2, e-mail: perederinyv@rambler.ru, тел: 89131168271.

Крайденко Роман Иванович, д.х.н., Заведующий кафедрой Химической технологии редких, рассеянных и радиоактивных элементов, НИ ТПУ, 634028, г. Томск, ул. Ленина,2, e-mail: kraydenko@tpu.ru, тел: 8 (3822) 70-16-03.