

А. Б. Липилин } гл. инженер
ООО «СтройМеханика»,
руководитель ИТП «ТехПрибор»

Н. В. Коренюгина } инженер-технолог
ООО «СтройМеханика»,

М. В. Векслер } инженер,
ведущий специалист
ИТП «ТехПрибор» (Тула)

{ 5-19-2007 } популярное бетоноведение

портландцемент

ударная активация

*Рассматривается технология увеличения активности цемента
и снижения его расхода в строительстве.*

Вопросы экономии, рационального использования энергетических и материальных ресурсов, снижения издержек производства в настоящее время приобретают особую актуальность и требуют грамотного решения.

Инновационные технологические схемы, позволяющие максимально полно использовать достижения научно-технического прогресса в деле оптимизированного пользования материальными и энергетическими ресурсами в строительстве, являются залогом успеха как отдельных предприятий, так и экономики страны в целом.

Сегодня строительная индустрия является одной из крупнейших отраслей народного хозяйства, и проблемы экономии ресурсов представлены здесь особенно остро. Следствием сложившейся ситуации являются высокое материалопотребление отечественного строительства, его высокая себестоимость и зачастую низкое качество.

Вместе с тем, существующие методы интенсификации производства материалов строительного назначения позволяют обеспечить существенный рост объёмов полезных результатов на фоне относительной стабильности материальных затрат.

Бетонные изделия и железобетонные конструкции являются в буквальном смысле основой современного строительства. Бетон прочно занимает ведущее положение по сравнению с другими строительными материалами.

Надёжность и долговечность бетонных и железобетонных конструкций, стойкость к воздействию агрессивных сред, относительно простая технология производства, возможность регулирования основных технико-эксплуатационных показателей и физико-механических характеристик, наконец, практически неисчерпаемая сырьевая база для производства вяжущих материалов и заполнителей — всё это объясняет широкое распространение

бетона и позволяет рассматривать его как основной компонент капитального строительства не только настоящего, но и будущего.

И всё же, несмотря на многие замечательные качества и доступность сырьевых компонентов, бетон относится к весьма энергоёмким строительным материалам. При этом наиболее дорогостоящим компонентом бетона является цемент. И хотя цемент — это дорогой и дефицитный материал, его перерасход в строительстве поистине огромен. Нехватка качественных заполнителей для бетона, несоответствие фактической и заявленной марки цемента, низкая культура производства бетонных изделий, пренебрежительное отношение к правилам подбора состава бетонной смеси, грубые нарушения правил транспортировки и хранения цемента — все эти факторы самым негативным образом влияют на качество и себестоимость бетона.

Так, использование песчано-гравийных смесей без корректировки

фракционного состава вызывает перерасход цемента до 100 кг/м³. Только при таком расходе цемента удастся получить запроектированную марку бетона по прочности и обеспечить нужную пластичность бетонной смеси. Только для ускорения набора распалубочной прочности бетона на предприятиях ЖБИиК расход цемента увеличивают на 20–25% от количества достаточного для получения материала заданной прочности. Низкая изначальная активность цемента или её катастрофическое снижение в результате неправильного складирования, небрежного транспортирования и частых перегрузок также вызывает его перерасход.

ния высокоактивных, быстротвердеющих цементов путём домолы рядового цемента. Большое число исследований посвящённых данной проблеме было проведено советскими учёными в 50–60 годах XX века. Тогда же был заложен фундамент сегодняшних знаний о теории и практике увеличения полезных свойств минеральных вяжущих веществ. Были исчерпывающе полно изучены особенности производства и применения цементов повышенной активности, разработаны рекомендации для их изготовления — с учётом минералогического состава цементного клинкера, оптимальных дозировок

На основании теоретических изысканий и натурных экспериментов были сделаны выводы о том, что увеличение тонкости помола цемента сказывается на его прочности и скорости твердения гораздо сильнее всех остальных рассматриваемых мероприятий. Поэтому для получения высокоактивного быстротвердеющего цемента необходимо увеличение тонкости помола с обычных 2000–3000 см²/г до 3500–4500 см²/г. Также отмечалось, что увеличение удельной поверхности цементного порошка сверх 6000 см²/г нецелесообразно. При изменении показателей удельной поверхности рядового цемент-

увеличение тонкости помола цемента сказывается на его прочности и скорости твердения гораздо сильнее всех остальных рассматриваемых мероприятий

Принимая во внимание, что, на фоне настоящей необходимости снижения удельного расхода дорогостоящих компонентов, современное строительство особенно остро нуждается в высокопрочных, быстротвердеющих бетонах, становится совершенно очевидно, что практическое воплощение ресурсосберегающих технологий невозможно без проведения целого комплекса работ по увеличению активности цемента и снижению его расхода в строительстве.

Хорошо известно, что основные свойства цемента, в том числе его активность и скорость твердения, определяются не только химическим и минералогическим составом клинкера, формой и размерами кристаллов алита и белита, наличием тех или иных добавок, но и, в большей степени, тонкостью помола продукта, его гранулометрическим составом, а также формой частичек порошка.

Существует богатый научно-производственный опыт получе-

гипса, необходимой тонкости помола, возможности введения минеральных добавок и целого ряда других параметров.

Вопросами производства и промышленного применения активированных цементов занимались такие известные советские учёные, как Б. Г. Скрамтаев, В. Н. Юнг, С. М. Рояк, Ю. М. Бутт, А. Е. Шейкин, Г. М. Рушук, М. И. Стрелков и многие другие. Несмотря на то, что результаты работ отдельных учёных и целых научных школ несколько отличались друг от друга, в обобщённом виде их можно представить следующим образом. Клинкер для производства высокоактивных цементов должен содержать повышенное количество быстротвердеющих клинкерных минералов. Оптимальная дозировка гипса зависит от минералогического состава клинкера, тонкости его помола, содержания стекловидной фазы и т.д. Тонкость помола быстротвердеющих высокоактивных цементов должна быть выше, чем у рядовых цементов.

ного порошка возможно получение цемента марок 600, 700 и 700 БТЦ. При этом минералогия и химический состав клинкера остаются неизменными.

На основании полученных результатов в короткое время было разработано необходимое технологическое оборудование средней и малой мощности, предназначенное для домолы рядового цемента. Началось активное внедрение технологии активации на предприятиях по выпуску бетонных изделий и конструкций. Количество вибропомольных узлов стремительно росло, но спустя короткое время интерес к активации цемента стал постепенно угасать, вплоть до практически полного забвения. Более того, тема изготовления быстротвердеющих, высокоактивных вяжущих материалов на заводах ЖБИ, т.е. в непосредственной близости от места изготовления бетона, была забыта настолько, что академическая наука не возвращалась к ней на протяжении нескольких десятилетий.

Но как могло произойти, что перспективнейшее направление, обещающее многомиллионную экономию и кардинальное улучшение основных характеристик цемента, после того, как были получены впечатляющие результаты, налажен промышленный выпуск оборудования, запущены экспериментальные участки и крупнотоннажные производства, было совершенно забыто?

Причина этого, казалось бы, парадоксального факта на наш взгляд заключается в экономической несостоятельности предлагаемого метода активации, что обусловлено неверно выбранным способом измельчения цементного зерна. Или, иными словами, многочисленные попытки внедрения активации цемента на местах его использования не привели к желаемым результатам, т.к. эффект повышения вяжущих свойств цемента не покрывал расходов на её осуществление.

Для того чтобы понять, насколько практическая эффективность активации цемента зависит от требуемой дисперсности продукта и выбранного типа помольного механизма, необходимо коротко остановиться на основных способах измельчения твёрдых тел.

Итак, под измельчением твёрдых тел мы понимаем направленное уменьшение их первоначальных размеров в результате механического или иного воздействия. В производстве цемента применяется измельче-

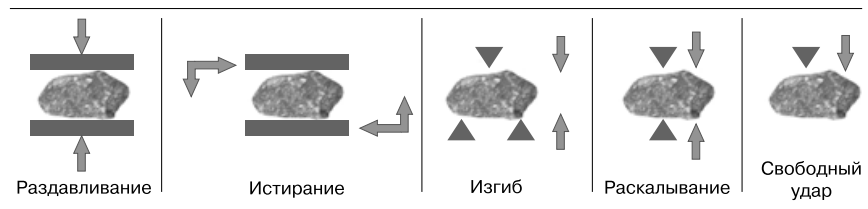


Рис. 1

Обычно в размольных машинах или мельницах разрушение твёрдого тела происходит несколькими способами в результате комбинированного воздействия, но преобладающим является один или два способа. Исходя из физических свойств твёрдого тела выбирается наиболее оптимальный способ его разрушения. Однако помимо физических свойств материала на выбор механизма измельчения, реализующего наиболее оптимальный способ разрушения, оказывает влияние исходный размер твёрдого тела и, в большей степени, требуемый размер частиц продукта измельчения.

Именно требования к дисперсности продукта имеют определяющее значение при выборе типа помольного оборудования и, соответственно, способа измельчения.

В качестве примера, иллюстрирующего связь наиболее рационального, а значит, и наименее энергетического, способа измельчения с исходным размером материала, можно привести следующую зависимость. Для среднего и крупного измельчения твёрдых тел исполь-

го способа побуждения мелющих тел, струйные мельницы, дезинтеграторы). Напрашивается вывод, что при неизменных физических свойствах твёрдого тела наиболее оптимальный способ разрушения может меняться в зависимости от размера измельчаемой частицы. Если один способ измельчения оправдан при получении частиц относительно большого размера, совершенно не очевидно, что этот же способ окажется эффективным при её дальнейшем разрушении. Напротив, практика использования помольно-дробильного оборудования в различных областях производственной деятельности показывает, что для максимально эффективного измельчения при минимальном расходе энергии с изменением объёма или линейных размеров частицы необходима и смена самого способа измельчения.

Существует чёткая зависимость между размером частицы и расходом энергии на её разрушение. Измельчение требует затрат энергии тем больше, чем выше требуемая степень измельчения. Данная зависимость приобретает особенную на-

{ существует чёткая зависимость между размером частицы и расходом энергии на её разрушение }

ние или диспергирование (от лат. *dispergo* — рассеиваю, рассыпаю) твёрдых тел, приводящее к образованию дисперсных систем или порошков. Разрушение твёрдых тел может производиться различными способами, наиболее распространёнными из которых представлены на рис. 1.

зуется раздавливание, раскалывание, изгиб, реж — удар (дробилки конусные, щековые, валковые, роторные). В то время как для тонкого измельчения преимущественно используется истирание и удар, либо комбинация этих двух способов (шаровые мельницы различно-

глядность при работе с высокодисперсными системами, к которым относится и цементный порошок.

Все твердые материалы характеризуются присущим им сопротивлением разрушению, причём на разных ступенях тонкого измельчения

сопротивление разрушению может существенно различаться. Так, при помоле цемента в шаровой мельнице до удельной поверхности 3000–3500 см²/г её прирост практически пропорционален затраченной работе. Однако при более высоких степенях измельчения дальнейший прирост удельной поверхности сопровождается повышенным расходом энергии, эффективность измельчения снижается.

Таким образом, с точки зрения оптимального соотношения количества затрачиваемой энергии, способа измельчения и дисперсности получаемого продукта, показатель удельной поверхности 2500–3000 см²/г объективно является предпочтительным. Обычно цементный порошок домалывается до означенной цифры и не более того. Происходит это потому, что даже с учётом увеличения активности цемента, повышения его марки дальнейший помол с использованием преимущественно истирающего способа измельчения попросту экономически не выгоден.

В работах по активации цемента путём его домола в основном применяются однокамерные барабанные и вибрационные шаровые мельницы малой и средней мощности. Т.е. для активации цемента используется помольное оборудование, энергоэффективность которого значительно уступает многокамерным барабанным мельницам большой производительности, используемым на цементных заводах. Эксплуатация высокопроизводительного помольного оборудования, применение воздушных сепараторов и замкнутого цикла производства цемента, теоретически обоснованное и подтверждённое многолетней практикой «золотое» соотношение между потенциальными возможностями мельниц данного типа, расходом энергии и оптимальной тониной помола позволяют цементным заводам вы-

пускать большие объёмы рядового цемента при достаточно высоком уровне рентабельности.

Совершенно иная ситуация наблюдается при попытках провести активацию цемента с использованием однокамерных шаровых или вибрационных мельниц небольшой производительности. Данный класс помольного оборудования в целом характеризуется достаточно низким коэффициентом полезного действия. Непосредственно на образование новых поверхностей затрачивается не более 8–10% от всей подводимой энергии. Удельная производительность (кг/ч) на 1 кВт эффективной мощности многокамерных шаровых мельниц, эксплуатируемых на цементных заводах, существенно выше, чем у помольного оборудования малой мощности.

Таким образом, становится очевидным несоответствие между поставленной задачей и средствами для её решения. Высокопроизводительное помольное оборудование используется для получения больших объёмов цемента средней активности, когда затраты энергии пропорциональны увеличению удельной поверхности порошка. В то же время, домол цемента для повышения его активности с применением измельчительного оборудования, характеризующегося крайне низким КПД, предполагает увеличение удельной поверхности порошка сверх энергетического оптимума для данного способа измельчения.

Потенциальные возможности энергоэффективного измельчения цементного зерна методом истирания оказываются исчерпаны уже на рубеже удельной поверхности в 3000 см²/г. Получение цементного порошка большей дисперсности с использованием однокамерных шаровых мельниц открытого цикла в условиях действующих пред-

приятий ЖБИ попросту экономически невыгодно. И бесплодные, хотя и многочисленные, попытки внедрения данной технологии в производство бетона лишний раз подтверждают это заключение.

Именно из-за несоответствия между результатами активации и затратами на её осуществление перспективное направление было закрыто на десятки лет. Даже сегодня «классическое» бетоноведение с большой настороженностью относится к вопросу увеличения активности цемента на местах его использования. Так много надежд было связано с «построечной» активацией цемента, и чувство разочарования от её неудачного внедрения ощущается до сих пор.

Но неверной была вовсе не сама идея активации, а её исполнение, аппаратное обеспечение и т.д. Результаты исследований высокоактивных цементов, производственная практика изготовления бетона с использованием быстротвердеющего цемента, наконец, сотни научных работ, авторами которых являются наиболее авторитетные представители отечественной науки, доказывают перспективность и даже насущную необходимость продолжения работ в данном направлении — естественно, с учётом прошлого опыта и новых знаний.

Так что же встало на пути перспективной технологии, какие проблемы не удалось решить инженерам и технологам, занятым в работах по активации цемента?

Первая проблема состоит в том, что однокамерные шаровые мельницы, используемые в работах по активации цемента, по основным экономическим, эксплуатационным и техническим показателям проигрывают оборудованию аналогичного назначения, но большей мощности.

Для получения высокоактивного быстротвердеющего цемента необходимо, в частности, увеличить тонины помола рядового цемента. Но используемые в работах по активации шаровые мельницы малой мощности серьёзно проигрывали по части себестоимости помола измелчительному оборудованию, эксплуатируемому на цементных заводах. Попытки увеличить показатели удельной поверхности цементного порошка оборачиваются снижением и без того небольшой производительности маломощных мельниц-активаторов и вызывают катастрофический расход энергии на получение продукта заданной дисперсности. Казалось бы, разорвать замкнутый круг невозможно. С одной стороны, дисперсность продукта требуется большая, чем у рядового цемента, с другой — мельницы-активаторы в принципе не могут соперничать с высокопроизводительным оборудованием цементных заводов в плане себестоимости помола. Но выход из создавшейся ситуации всё же есть. Если способ истирающего измелчения, реализуемого шаровыми мельницами, по целому ряду причин не подходит для получения большей тонины помола цементного порошка, то нужно применить другой способ измелчения!

Сырьевые материалы, используемые при изготовлении цемента, характеризуются высокой проч-

никают напряжения, приводящие к разрыву с образованием более мелких частиц. Такой способ измелчения реализуется в шаровых мельницах различного способа побуждения мелющих тел. До определённой тонины помола данный способ вполне оправдан, т.к. площадь новообразованных поверхностей прямо пропорциональна затраченной работе. Но с увеличением удельной поверхности порошка расход энергии возрастает, а прирост удельной поверхности замедляется. После достижения определённой тонины помола способ измелчения цементного зерна методом сжатия — истирания перестаёт быть оптимальным.

С увеличением требований к тонине помола цементного порошка существенное уменьшение затрат энергии могут дать лишь те способы, при которых материалы измелчались бы под влиянием прямых сдвигающих, разрывающих воздействий на них, а не в результате первоначально сжимающих сил. В струйных мельницах и дезинтеграторах цементные зёрна измелчаются почти исключительно путём свободного удара о помольные органы и (или) взаимного соударения в воздушном потоке при движении. Совокупность таких воздействий вызывает быстрое разрушение цементных зёрен по местам структурных дефектов и позволяет получать про-

измелчения, использование агрегатов свободного удара — дезинтеграторов и струйных мельниц может рассматриваться как практически безальтернативный способ повышения вяжущих свойств и снижения расхода цемента в производстве изделий из бетона. Применение помольного оборудования ударного действия позволяет получать вяжущие вещества и наполнители при минимальных затратах.

Проблема вторая заключается в самой необходимости более тонкого помола цементного порошка. Тонкий помол материала является наиболее энергозатратным, а значит, и дорогостоящим переделом в производстве цемента. До 70% затрат приходится именно на помол. В себестоимости активации помол также является основной статьёй расходов.

Но так ли необходимы высокие показатели удельной поверхности цемента? Имеются ли способы получения высокоактивного цемента без существенного увеличения тонины помола? Такие способы существуют, они хорошо известны и активно применяются уже не один десяток лет.

Выше мы отмечали, что, по данным исследований, повышение тонкости помола — это действенный способ увеличения прочности цемента

{ повышение тонкости помола — это действенный способ увеличения прочности цемента и скорости его твердения

ностью на сжатие и относительно малой прочностью на изгиб. Прочность цементного зерна на сжатие в 6–12 раз больше его же прочности на изгиб, растяжение, сдвиг. В шаровых мельницах зёрна цементного порошка подвергаются, преимущественно, действию сжимающих сил с двух сторон, в результате которого в зёрнах воз-

дуток, характеризующий оптимальным гранулометрическим составом и осколочной формой частиц.

Принимая во внимание, что наиболее перспективным направлением снижения материальных и энергетических затрат при активации цемента является понижение энергоёмкости самого процесса

и скорости его твердения. Но увеличение удельной поверхности цементного порошка, как и его активность, нельзя рассматривать в отрыве от гранулометрических показателей высокодисперсной системы, которой и является цемент.

Т.к. различные фракции цементного порошка по разному влияют на

прочность цементного камня и на скорость его твердения, целый ряд исследователей рекомендуют характеризовать активность цемента не только по удельной поверхности порошка, но и по зерновому составу. Многочисленные исследования, проводившиеся как в нашей стране, так и за рубежом, позволили установить зависимость между количеством зёрен определённого размера, прочностью и скоростью твердения цемента. На основании работ А. Н. Иванова-Городова было установлено, что равномерное и быстрое твердение цемента достигается при следующем зерновом составе: зёрна мельче 5 мкм — не более 20 %, зёрна 5–20 мкм — около 40–45 %, зёрна 20–40 мкм — 20–25 %, зёрна крупнее 40 мкм — 15–20 %. Правильно сформированный гранулометрический состав позволяет получать высокоактивный быстротвердеющий цемент при абсолютно рядовых показателях его удельной поверхности.

Изменение дисперсности цементного порошка при его помоле происходит на фоне изменения и его гранулометрического состава. Однако соотношение различных фракций, близкое к оптимальному при помоле в шаровой мельнице, достигается при получении относительно высоких показателей удельной поверхности. В то время как при использовании дезинтеграторов, струйных мельниц и других агрегатов ударного измельчения оптимизация гранулометрических показателей происходит без существенного изменения дисперсности продукта.

На основании многочисленных исследований было установлено, что гранулометрический состав продукта измельчения зависит от типа по-

мольного механизма. Готовый продукт, полученный с использованием шаровых мельниц, характеризуется широким зерновым составом, а его частицы имеют окатанную форму. Разнообразный зерновой состав представлен как очень тонкими частицами (>5 мкм), так и относительно крупными (>60 мкм), содержание которых, даже в высокомарочных цементах, достаточно высоко. В то же время для ударного измельчения с применением дезинтеграторов и струйных мельниц характерно получение материала узкой гранулометрии, когда зерновой состав цементного порошка близок к оптимальному.

Возможности гранулометрического «обогащения» цементного порошка наглядно демонстрирует представленная таблица. Повышение активности цемента после дезинтеграторного помола достигается при более низких показателях удельной поверхности по сравнению с материалом, измельченным на шаровой мельнице. Таким образом, тонкий помол с получением цементного порошка высокой дисперсности как наиболее энергонапряжённый процесс активации может быть успешно заменён корректировкой гранулометрического состава.

Ещё одним действенным способом увеличения активности цемента без существенного изменения его дисперсности является изменение формы цементного зерна при его помоле. В зависимости от типа помольного механизма существенно изменяется форма цементного зерна. Так, форма частиц цемента осколочной «щебёночной» формы с острыми углами и сильно развитой конфигурацией взаимодействует с водой более интенсивно,

чем частицы цемента округленной, галькообразной формы.

При равных показателях удельной поверхности, равном содержании частиц цемента размерами 0–20 мкм, одинаковом химическом составе прочность цементного камня, состоящего из частиц осколочной формы, будет выше, нежели прочность цементного камня, состоящего из частиц округлой формы. Соответственно и скорость твердения портландцемента с осколочной формой частиц выше, чем с округлённой. Исследования Ю. И. Дешко, В. И. Акунова, В. Л. Панкратова и др. (НИИЦемент) показали, что при измельчении цементного клинкера в струйной мельнице получают цементы, активность которых на 7,5–15,0 МПа выше активности цементов той же тонкости помола, но измельчённых в шаровой мельнице.

Существующая зависимость формы цементного зерна от типа помольного агрегата позволяет сделать выводы о наиболее предпочтительном способе разрушения, обеспечивающем получение частиц осколочной формы.

Таким образом, ударное измельчение цементного порошка позволяет существенно повысить его физико-химическую активность наиболее рациональным способом, в большей мере за счёт корректировки гранулометрического состава и изменения формы зерна.

Сегодня, когда существующие модели помольного оборудования позволяют реализовать наиболее энергопродуктивные способы измельчения, идеи активации цемента на предприятиях ЖБИ получают второе рождение. Ударное дезинте-

{ ударное измельчение цементного порошка позволяет существенно повысить его физико-химическую активность наиболее рациональным способом

Наименование материала	Удельная поверхность, см ² /г	Содержание, %, фракций, мкм								Предел прочности на сжатие через 28 сут., МПа
		≤ 5	≤ 10	≤ 20	≤ 30	≤ 40	≤ 50	≤ 60	более 60	
Исходный цемент	2250	11,07	8,25	14,64	17,97	16,66	13,50	9,36	8,55	39,5
Активированный цемент, домолотый на шаровой мельнице	3200	15,32	7,11	12,54	20,51	19,62	15,03	6,52	3,35	50,9
Активированный цемент, домолотый на измельчителе-дезинтеграторе	2800	12,84	15,22	29,67	24,13	10,58	5,37	2,19	–	51,3

Таблица 1. Характеристики цементов различного способа измельчения

граторное измельчение, оптимизация гранулометрического состава цементного порошка, позитивные изменения формы цементного зерна являются инструментами экономически оправданной активации. Объединение результатов фундаментальных исследований 50–60-х годов и современной концепции рационального использования энергоресурсов вполне возможно, если решить две основные проблемы, которые и явились препятствием к реализации технологии активации рядового цемента на местах его использования.

Литература:

1. Бутт Ю. М. Быстротвердеющий портландцемент: Сборник трудов по химии и технологии силикатов. — М., 1957.
2. Волженский А. В. Минеральные вяжущие вещества: Учебник для вузов. — Стройиздат, 1986.
3. Волженский А. В., Попов Л. Н. Смешанные портландцементы повторного помола и бетоны на их основе. — Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961.
4. Хинт И. А. Основы производства силикальцитных изделий. — Госстройиздат, 1962.



ТЕХПРИБОР
ЦЕНА/КАЧЕСТВО/СЕРВИС

**дробление - помол -
- механоактивация**






Механоактивация цемента
Производство активных минеральных добавок
Переработка техногенных отходов
Производство высокодисперсных материалов
Классификация

- Измельчители-дезинтеграторы серии «Горизонт»
- Модульные комплексы измельчения сыпучих материалов типа «МОЛОТ»
- Роторные дробилки типа «ВЕЙДЕР»
- Роторно-центробежные дробилки типа «Блиц»
- Смесители-активаторы серии «Фагот»
- Воздушно-центробежные классификаторы
- Винтовые конвейеры типа «ВК»

РФ, г. Тула, пос. Рудаково, ул. Люлина, 6А;
Тел/факс: 8 (4872) 33-09-78;
Тел: 8 (905) 626-79-10, 8 (905) 626-93-07,
8 (903) 658-62-41;
ICQ: 218946684; e-mail: manager@tpribor.ru

www.tpribor.ru