

**ОТРАСЛЕВЫЕ
ПРОБЛЕМЫ**

**ПРОБЛЕМЫ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ПРИРОДНЫХ АЛМАЗОВ: СОВРЕМЕННЫЙ КОНТЕКСТ¹**

© 2011 г. А.А. Фридман

(Москва)

Мировая добыча алмазов падает, новые месторождения не открыты, а спрос на алмазы растет, что резко обостряет вопрос их эффективного использования. Строится модель типа *Input–Output* для производства бриллиантов с уникальной системой обработки. Она позволяет вычислить весовые потери алмазов (с их высочайшей удельной стоимостью и редкостью) при производстве. Исследуются свойства модели, доказано наличие, единственность и неотрицательность ее решения. Поскольку “отходы производства” превышают 50% исходного веса алмазов, необходимы новые технологии их обработки.

Ключевые слова: алмаз, бриллиант, модель, решение, эффективность производства.

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что природные алмазы были и остаются исключительно редким минеральным ресурсом, о чем свидетельствует мировая статистика добычи. Приведем для наглядности следующие данные в таблице.

Таблица. Объемы мировой добычи драгметаллов и алмазов в 1980–2008 гг., т

Редкие минеральные ресурсы	1980	1990	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Золото	1210	2230	2550	2530	2550	2540	2420	2470	2370	2340	2280
Платина		129	160	172	178	195	194	212	217	208	189
Алмазы	8,8	22,2	24,4	25,5	28,2	31,6	33,0	36,6	34,8	33,8	31,8
Ювелирные алмазы	2,0	10,4	13,4	14,6	15,3	17,6	17,7	18,6	18,8	18,5	17,4

Источник: U.S. Geological Survey. Minerals Yearbook, 2000–2008.

Из данных таблицы видно, что ежегодный объем добычи золота (редкого драгоценного металла) на **порядок** превосходит объем ежегодной добычи платины и на два порядка – объем годовой добычи ювелирных алмазов².

Здесь уместно отметить, что рост (и соотношение) ценовых удельных характеристик этих ресурсов соответствует увеличению соотношения объемов их добычи. Так, например, в ноябре 2010 г. цена 1 тройской унции³ золота достигала 1 350 долл., а платины – 1 650 долл. Хороший алмаз весом в 1 карат (0,2 г) в это время стоил 1 500 долл., качественный бриллиант весом в

¹ Автор выражает благодарность Т.Д. Березневой за замечания, позволившие улучшить текст статьи.

² Природные алмазы делятся на ювелирные и технические. Ювелирные алмазы – самые качественные по структуре и самые высокие по стоимости природные алмазы. В каждом месторождении встречаются оба типа алмазов, причем на долю ювелирных обычно приходится не более 25–30% общего объема добычи. Вместе с тем цены природных ювелирных алмазов в сотни раз превосходят цены технических. Граница между этими типами алмазов несколько условна, и в последнее время между ними стали выделять некоторую прослойку, получившую естественное название – “околоювелирные алмазы”.

³ 1 тройская унция составляет 31,1 г.

1 карат – 24 500 долл. (а весом в 2 карата – 44 000 долл.). Если привести эти данные к одной единице измерения – к 1 карату, – то мы получим, что цена 1 карата золота была 8,7 долл., а 1 карата платины – 10,6 долл.

Не может не произвести впечатления то, что в соответствии с этими данными для получения 1 млн долл. надо было иметь 23 кг золота, или ~19 кг платины, либо 667 штук хороших алмазов по 1 карату каждый (общим весом 134 г), а качественных бриллиантов по 1 карату каждый – всего 41 штуку **общим весом 8 г**, а по 2 карата – 23 штуки весом 4,5 г. Именно поэтому богатейшие люди старались “на всякий случай” иметь дорогие бриллианты, чтобы в чрезвычайных ситуациях скрыться с небольшим по весу запасом бриллиантов.

Мировая ежегодная добыча природных, и в частности ювелирных, алмазов в последние 40 лет неуклонно росла практически до последнего времени, о чем свидетельствуют графики на рис. 1.

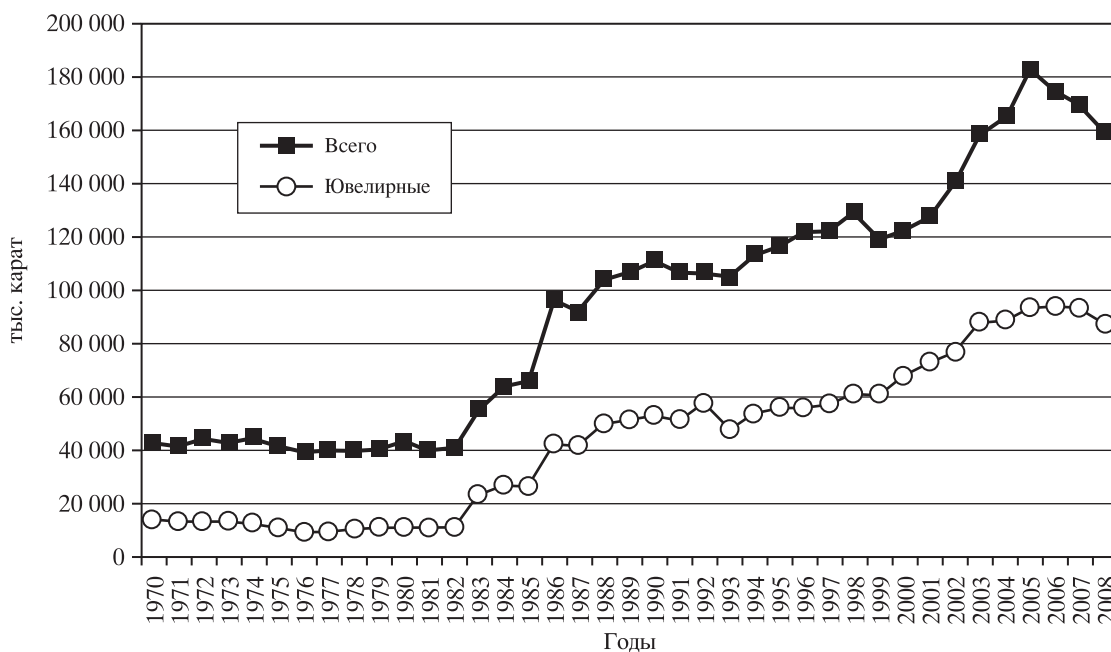


Рис. 1. Динамика мировой добычи алмазов (1970–2008 гг.)
 Источник: U.S. Geological Survey Minerals Yearbook. 1970–2008.

Эти графики показывают наличие разных периодов добычи: 1) 1970–1983 гг.; 2) 1983–2000 гг., 3) 2001–2005 гг., 4) 2006 г. – по настоящее время. В первом периоде роста добычи фактически не было, поскольку снижение добычи в Африке (из-за политических катаклизмов прекратилась добыча в Заире и Западной Африке) компенсировалось освоением и ростом добычи в Якутии и Ботсване. Рост добычи в двух следующих периодах в основном объясняется освоением новых крупных месторождений: во втором периоде это был Аргайл (в Австралии), в третьем – Экати (Канада), Нюрба (Россия) и Каток (Ангола). В последнем периоде даже освоение Снэп-Лейк и Диавик (Канада), а также наращивание добычи на руднике Мурува и в районе Маранге (Зимбабве) не смогло компенсировать выветывание или истощение старых крупных рудников.

В связи с этим важно отметить следующие два обстоятельства.

А. Статистика свидетельствует, что освоение крупного месторождения (с момента его открытия) требует, как правило, в среднем около 7–10 лет.

Б. В последнее время ученые, аналитики, руководители крупнейших алмазодобывающих компаний – Н. Похиленко (член-корреспондент РАН, директор института Геологии СО РАН), И. Зохар (крупнейший аналитик алмазной отрасли и IDEX Online), Г. Пенни (управляющий директор компании “Де Бирс”) и другие обратили внимание на то, что за последние 20–25 лет

не было открыто ни одного месторождения мирового масштаба⁴. А несколько новых или уже имеющихся маленьких приисков не в состоянии скомпенсировать постепенное истощение запасов крупных месторождений, близких к полной выработке ресурсов. Учитывая, что поиск новых месторождений требует времени, а денег на геологоразведку не хватает (особенно в связи с кризисом), то, даже если в ближайшее десятилетие будут обнаружены новые алмазные месторождения, может потребоваться еще не менее 10 лет, пока там начнется промышленная добыча алмазов.

Более того, ситуация обостряется и тем, что к 2025–2030 гг. ожидается окончание эксплуатации таких крупных месторождений, как Орапа и Джваненг (в Ботсване), Аргайл (Австралия), Венешиа (ЮАР), Финч (ЮАР), а также истощение таких сравнительно новых месторождений, как Катока (Ангола), Снэп-Лейк и Диавик (Канада). Кроме того, и на российских уникальных месторождениях добыча осложняется в связи с переходом от добычи в карьерах к строительству и эксплуатации дорогостоящих подземных рудников.

Таким образом, мировое производство алмазов вступает в период, когда, достигнув пикового уровня в 183 млн каратов в 2005 г., оно, скорее всего, снизится до 120–130 млн каратов в год и продержится на этом уровне вплоть до 2020 г. Затем, если не будут открыты и освоены новые месторождения или не будет продлена жизнь некоторых старых (где возможна добыча при новых технологиях, или при резком снижении издержек производства, или росте рентабельности на фоне недостатка предложения и росте цен на алмазы), мы, весьма вероятно, будем наблюдать дальнейший спад мирового производства природных алмазов.

В связи с этим уместно привести следующие слова Г. Пенни (Пенни, 2010): “За двадцать лет в отрасли не найдено ни одного нового месторождения алмазов, сопоставимого с двумя самыми большими рудниками “Де Бирс” в Африке или с лучшими российскими рудниками “АЛРОСА” – другого крупного производителя алмазов... Алмазы – природное богатство, которое должно сберегаться надлежащим образом, так как в будущем их для продажи будет меньше. Реальность состоит в том, что не удастся поддерживать высокий объем поставок, и в ближайшие 15 лет эта ситуация будет только усугубляться”.

Учитывая сказанное, естественно, возникает вопрос об эффективности использования природных алмазов, особенно – самых дорогих, т.е. ювелирных алмазов.

2. ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЮВЕЛИРНЫХ АЛМАЗОВ И ЕЕ ИЗМЕРЕНИИ

Известно, что природные ювелирные алмазы идут на производство бриллиантов и ювелирных изделий. При этом около 85% производимых в мире бриллиантов – круглые бриллианты. Производство бриллиантов построено так, что каждый кристалл алмаза обрабатывается независимо от других. В рыночных условиях критерием эффективности использования ювелирных алмазов является получение из каждого кристалла алмаза продукции максимальной стоимости⁵.

Вместе с тем при осмыслении вопроса эффективного использования алмазного сырья в производстве бриллиантов нельзя абсолютно игнорировать такой традиционный показатель, как КВГ (коэффициент выхода годного) – отношение суммарного веса полученных из партии алмазов бриллиантов к весу этой партии алмазов⁶. Показатель КВГ можно исчислить как для одного, конкретного, кристалла алмаза, так и для произвольной партии алмазов. При этом, если рассматривать определенный период производства, можно формировать и соответствующий показатель КВГ в этом периоде. Более того, такой показатель можно исчислять и применительно к различным типам алмазов, чтобы понять, как КВГ зависит от типа алмазов, перерабатываемых в бриллианты. В условиях, когда мировая добыча алмазов истощается, проблема эффективного использования алмазного сырья приобретает особую значимость.

⁴ См., например, (Похиленко, 2007; Зохар, 2010; Пенни, 2010; Jance, 2007).

⁵ Издержки производства бриллиантов весьма малы по сравнению со стоимостью бриллианта.

⁶ Этот показатель употребляется и сейчас, например, когда хотят подчеркнуть, что в гранильной отрасли Индии он весьма низкий и находится на уровне 23%, а в Израиле – 40%.

Очевидно, что, с абстрактно-логической точки зрения, КВГ может изменяться от 0 (при обработке алмазов все ушло в отходы, и бриллианты не получены) до числа $q < 1$ (при переработке алмаза в бриллианты какая-то часть алмаза обязательно теряется). Обычно КВГ выражают в процентах, т.е. он находится в интервале (0–100%). Вопрос о численном значении КВГ при производстве бриллиантов далеко не праздный и связан со следующими обстоятельствами.

1. Алмазы – ресурсы высочайшей удельной ценности, а стоимость отдельного бриллианта (при прочих равных условиях) тем больше, чем больше его вес.

2. Эффективность производства существенно связана с уровнем технологии производства и мастерства работающих.

3. Исторически сложилось так, что в алмазо-бриллиантовом (АБ) производстве до сих пор свыше 50% алмазного сырья шло и идет в отходы, т.е. $КВГ < 50\%$, что является характеристикой АБ-производства, которое, как и три века назад, состоит из 7 основных операций, причем только на двух (изучение алмаза и оценка полученного бриллианта) не происходит уменьшения веса обрабатываемого алмаза.

4. Ошибка в любой операции влечет существенные и, как правило, невозполнимые (необратимые) потери, поскольку после выполнения каждой операции (кроме оценки) полученные полуфабрикаты нельзя вернуть в предыдущее состояние.

На каждой из этих операций за последние четыре века имели место усовершенствования, среди которых следует особо выделить два революционных:

- а) на операции “разметка алмазного сырья”;
- б) на операции “распиливание алмазного сырья”.

Первый и весьма существенный сдвиг связан с использованием новых средств поиска как можно лучшего варианта использования каждого кристалла алмаза для получения из него бриллиантов наибольшей стоимости, для чего в XX в. начали использовать математику⁷, математическое моделирование, методы оптимизации, персональные компьютеры, видеотехнику и современное приборное обеспечение.

Второй сдвиг связан с внедрением лазерной техники, позволившей кардинально повысить качество и точность резания алмаза и тем самым существенно сократить потери при реализации даже выбранного плана обработки алмаза⁸.

Оба этих сдвига привели к революции в технологии производства бриллиантов, что в корне преобразило веками сложившееся и весьма консервативное производство.

Во всем этом огромную роль сыграли ЭВМ и персональные компьютеры, без которых ни одно из этих изменений нельзя было реализовать.

Естественно, возникает вопрос, а как при всем этом изменился КВГ, и более того – как его вычислять в условиях массового производства, когда (и если):

– каждый кристалл природного алмаза неповторим, обладает индивидуальными особенностями (по форме, структуре, наличию и местоположению дефектов, их типу и размерам, геометрии граней), что порождает различные организационно-технологические маршруты их обработки, т.е. различные последовательности прохождения алмазов через основные операции;

– при этих операциях алмаз разделяется на части, возможны возвраты его частей на предыдущие операции (например, при многократном распиливании, подшлифовке и т.д.);

⁷ Впервые комплекс задач оптимального использования алмазов был предложен и решен учеными ЦЭМИ АН СССР, а затем реализован на Московском заводе “Кристалл”. При этом была разработана математическая теория кристаллов, построены комбинаторные и аналитические модели алмазного сырья, сформулированы задачи оптимального вложения бриллиантов в алмаз, построены методы их решения. Подробнее см. (Фридман, 2009).

⁸ Так, директор крупнейшего в мире Смоленского завода “Кристалл” М. Шкадов утверждает, что внедрение лазерных технологий на операции “распиливание” позволило снизить на 1% потери при обработке, что при высочайшей удельной стоимости алмаза и бриллианта дает существенный эффект (Черепанова, 2010).

– длина (время) полного цикла обработки кристалла алмаза может исчисляться месяцами, а информация о предыстории алмаза (или полуфабриката) может теряться, если не вести специальный учет, и т.д.

Таким образом, от начала обработки кристалла алмаза и до конца – т.е. до получения продукции из всех его частей – проходит много времени, в обработке участвуют разные специалисты. Поэтому получить полную и достоверную информацию типа “в производство запущены алмазы суммарной массой M , в результате обработки из них получены бриллианты суммарной массой m ” – зачастую получить практически невозможно, если в процессе производственного цикла не тратить на это специальных усилий и средств, что может существенно удорожить производство.

Возникает вопрос, как объективно исчислять КВГ за определенный промежуток времени (месяц, квартал, год) в условиях реального производства. Следует отметить, что в условиях массового производства на отечественных заводах “Кристалл” показатель КВГ исчислялся на основе обработки опытных партий. Это весьма трудоемкий и длительный процесс, охватывающий к тому же весьма незначительную часть производства, имеет экспериментальный характер. Специалисты понимают, что экстраполировать его результаты на все производство и на разные периоды неправомерно. Использовался и другой способ, где применялись приближенные формулы с коэффициентами, формируемыми на основе статистических данных о фактической работе предприятия за фиксированный период времени в прошлом. Этот способ также имел много недостатков, поскольку, например, в разные периоды времени обрабатывали разное алмазное сырье.

Все это свидетельствует об актуальности разработки метода исчисления КВГ на производстве бриллиантов в условиях крупномасштабного производства.

3. КАК ДВИГАЮТСЯ АЛМАЗЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БРИЛЛИАНТОВ

Технология производства бриллиантов довольно консервативна и до сих пор основывается на последовательном прохождении алмазов и возникающих при их обработке полуфабрикатов через семь основных операций, которые имеют особые названия. Ниже мы перечислим операции и пронумеруем их, чтобы в дальнейшем использовать номера операций для формирования различных коэффициентов (параметров) с индексами этих операций, необходимых при построении модели: 0 – сортировка и разметка; 1 – распиливание; 2 – раскалывание; 3 – подшлифовка; 4 – обдирка (или обточка); 5 – огранка; 6 – выпуск готовой продукции.

Опишем кратко каждую операцию и один из типовых технологических маршрутов обработки *октаэдрического алмаза* при производстве из него *круглых бриллиантов*⁹. Выберем для этого линейный маршрут обработки следующего вида:

$$0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6.$$

А. На операции 0 алмаз (полуфабрикат) изучает технолог, который на основе имеющихся у него средств определяет расположение будущих бриллиантов в теле кристалла (фиксирует соответствующую разметку алмаза, как правило, для производства двух круглых бриллиантов) и направляет алмаз на операцию 1 (распиливание). На операции 0 алмаз не подвергается никаким физическим воздействиям, которые могут уменьшить его вес. Однако эта операция ключевая, так как на ней из многих тысяч (!) вариантов размещения (вложения) бриллиантов в кристалле алмаза надо выбрать оптимальный. Он фиксируется в виде разметки алмаза, которая и определяет дальнейшую обработку алмаза. Ошибочный выбор разметки и ее выполнение на последующих операциях влечет за собой потери, величина которых может быть весьма большой.

⁹ Октаэдрический алмаз получается из правильного (идеального) октаэдра, если некоторые из его 8 граней подвинуть параллельно самим себе (см. приложение). Круглый бриллиант напоминает тело вращения типа юлы, на которое нанесены плоские грани. Классический круглый бриллиант имеет 57 плоских граней, главная из которых располагается вверху, имеет форму круга и перпендикулярна оси вращения бриллианта. Она называется “площадкой”. Именно на нее обычно смотрят, когда разглядывают бриллиант и игру граней в лучах света (см. Приложение). Подробнее об этом можно прочитать в работе (Фридман, 2009).

Б. На операции 1 кристалл в соответствии с разметкой распиливается по плоскости на две части (полуфабрикаты), причем эта плоскость становится верхней площадкой каждого из двух будущих круглых бриллиантов, один из которых обычно обладает максимальной стоимостью. При этом происходит потеря веса, т.е. вес возникших двух полуфабрикатов меньше веса исходного кристалла алмаза. После этого каждый полуфабрикат изучает технолог, он фиксирует номер операции для последующей обработки. В данном случае оба полуфабриката направляются на операцию 2 – раскалывание.

В. На операции 2 от полуфабриката (а иногда и от исходного кристалла) откалывают часть, которая является лишней с точки зрения расположения в полуфабрикате (алмазе) будущего бриллианта (из этой лишней части можно еще что-то изготовить, а если ее не отколоть, то она будет потеряна – превращена в пыль при дальнейшей обработке, например при обдирке или подшлифовке, – как ненужная). После этого каждый полуфабрикат изучает технолог и фиксирует номер следующей операции. Здесь тоже происходит потеря веса. Обычно после этого полуфабрикаты направляются на операцию 3 (подшлифовку).

Г. На операции “подшлифовка” ликвидируются различные неизбежные неровности – исходные и возникающие на предыдущем этапе обработки, которые мешают дальнейшей обработке. На операции 3 происходит потеря веса. Затем технолог изучает результаты операции и обычно направляет полуфабрикаты на операцию 4 (обдирка).

Д. На операции 4 алмазный полуфабрикат “обдирается или обтачивается”, и ему придается форма тела вращения, причем площадка (на плоскости распиливания) должна быть ортогональна оси вращения будущего круглого бриллианта. Здесь происходит очень большая потеря веса. Далее результат обработки изучает технолог, который определяет последующую операцию обработки. В обычном, “штатном”, режиме – это операция 5 (огранка).

Е. На операции 5 на полуфабрикат наносят разные плоские грани, что является важнейшей операцией, после которой и возникает бриллиант. На этой длительной операции происходят небольшие потери, причем нередко возникает необходимость повторить операцию “подшлифовка”. После огранки бриллиант направляется на операцию 6, где происходит его оценка.

Ж. На операции 6 (оценка) бриллианты тщательно сортируют по физико-техническим характеристикам, далее производится весовая и стоимостная оценка бриллиантов. Стоит отметить, что взвешивание бриллиантов (и алмазов) осуществляется на специальных весах в каратах (0,2 г) с точностью до третьего знака после запятой. При этом весовых потерь не происходит.

Маршруты движения алмазов и полуфабрикатов неоднозначны и зависят прежде всего от формы алмазов, наличия в них дефектов и их видов. Это и неудивительно, так как практически каждый кристалл алмаза обладает индивидуальностью. Недаром говорят, что каждый алмаз неповторим, а любые два кристалла отличаются между собой. Круглый бриллиант по форме существенно отличается от алмаза, он похож на тело вращения, обладает особой симметрией, пропорциями своих частей и геометрией граней (см. Приложение). Этим объясняется необходимость индивидуального подхода к обработке алмаза на производстве бриллиантов, что реализуется в разнообразных маршрутах обработки алмаза.

Например, маршруты могут иметь вид:

$$0 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6$$

(здесь сначала алмаз раскалывается, потом подшлифовывается, распиливается, снова подшлифовывается и т.д.);

$$0 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6$$

(здесь форма кристалла будет такой, что не потребует раскалывания).

Производство бриллиантов¹⁰ построено так, что каждый кристалл алмаза обрабатывается независимо от других, маршрут его обработки контролируют технологи на каждой операции, куда он поступает с набором индивидуальных параметров (в частности, с указанием веса) и выходит

¹⁰ Речь идет о переработке средних и более крупных алмазов, которые обрабатывают индивидуально, при тщательном контроле технологов, тогда как мелочь обрабатывается в общем потоке.

после операции с аналогичным набором параметров (но с новыми значениями) и указанием следующей операции. Для восстановления всего технологического маршрута обработки достаточно (как в динамическом программировании) сохранять при полуфабрикате на каждой последующей операции номер предыдущей и сопровождающий документ о наборе параметров.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ НА ПРОИЗВОДСТВЕ БРИЛЛИАНТОВ

Опишем математическую модель движения алмазов и алмазных полуфабрикатов в процессе массового производства бриллиантов. Эта модель была разработана нами на Московском заводе “Кристалл”, где внедрялись многие разработки ЦЭМИ и действовала система компьютерного мониторинга движения алмазов и полуфабрикатов при производстве бриллиантов. Указанная модель описывает взаимосвязь между характеристиками входа на любую из основных операций, где происходит “физическая обработка алмазов и возникающих алмазных полуфабрикатов”, и характеристиками выхода после завершения этой операции. Она, как будет показано ниже, позволяет вычислять весовые потери и КВГ.

Мы отмечали ранее, что после каждой операции технолог тщательно изучает полученные полуфабрикаты, он же определяет следующую операцию обработки. На всех операциях, кроме 0 и 6, происходит “физическая обработка алмазов и возникающих алмазных полуфабрикатов”, и как следствие – “потеря веса”, т.е. вес обрабатываемых полуфабрикатов уменьшается. Поэтому в модели можно ограничиться взаимосвязями только между основными операциями 1–5.

Не вдаваясь в разнообразные детали режимной схемы построения производства бриллиантов, упростим изложение этого процесса, опуская не нужные нам детали. Будем считать, что перед направлением полуфабрикатов на обработку их сначала сортируют в пакеты, на каждом таком пакете указывается номер следующей операции и фиксируются упомянутые выше параметры полуфабрикатов.

Заметим, что, поступая по указанию технолога на очередную операцию, полуфабрикат может временно на ней не обрабатываться, образуя так называемое “незавершенное производство”.

Далее описывается балансовая модель АБ-производства для фиксированного периода времени (неделя, месяц, квартал, год). В качестве исследуемого периода возьмем любой месяц, например май.

В начале исследуемого периода на складе имеется алмазное сырье, отсортированное по пакетам, в каждом из которых имеется несколько алмазов с полным набором их характеристик. На каждом пакете указан адрес i операции, на которую направляется сырье для переработки ($i = 1, \dots, 5$).

Кроме того, на каждой операции i есть полуфабрикаты алмазов, которые пришли ранее для обработки на операции i , с наборами параметров и с указанием их общей суммарной массы D_i в каратах.

Поскольку на каждой из перечисленных операций алмаз или полуфабрикат подвергается переработке (распиливание, раскалывание, подшлифовка, обдирка, огранка), то его масса в процессе обработки неуклонно уменьшается, и после завершения полного цикла обработки из исходных кристаллов алмаза получают бриллианты. (Этот процесс напоминает работу скульптора, создающего из монолита скульптуру путем удаления из монолита ненужных с точки зрения достижения конечной цели частей.)

Все это позволяет сформировать за весь исследуемый промежуток времени для каждой операции i цикла обработки **балансовое соотношение** между входом на операцию i и выходом из нее. Это балансовое соотношение будет характеризовать **изменение** масс (веса) полуфабрикатов при переработке на каждой операции.

Для упрощения текста и формулировок введем ряд удобных сокращений. На операцию могут поступать как еще необработанные алмазы, так и возникшие из них после операций алмазные полуфабрикаты. Вместо этого будем для краткости писать “алмазы”. Как синонимы будем употреблять словосочетания “масса алмазов” и “вес алмазов”. Словосочетание “вес алмазов после операции i ” означает вес алмазов, взвешенных после их обработки на операции i . Аналогично

словосочетание “вес алмазов, направленных после операции i на операцию j в мае” означает вес алмазов, **взвешенных** после операции i и сразу после этой операции **направленных** в мае **для обработки** на операцию j . При этом некоторые из них в мае на операции j могут и не обрабатываться и образуют так называемое незавершенное производство на операции j .

Введем ряд обозначений: Y_{ij} – вес алмазов, направленных после операции i на операцию j в мае; W_{ij} – вес алмазов, обработанных в мае сначала на операции i и сразу после этого на операции j (т.е. вес алмазов после обработки на операции j с кодом предыдущей операции i); D_i – вес алмазов, находящихся в начале мая на операции i , но не обработанных на ней (начальное незавершенное производство на операции i); Δ_i – изменение величины D_i за май (т.е. в начале мая было какое-то незавершенное производство D_i , а в конце мая величина D_i могла либо увеличиться, либо уменьшиться); $D_i + \Delta_i \geq 0$ – новое значение незавершенного производства, причем Δ_i может иметь любой знак.

Положим $S_i = \sum_{j=1}^5 Y_{i,j}$, где $i = 0, \dots, 5$. Здесь S_0 – суммарный вес алмазов, направленных со склада после операции 0 (сортировки алмазов) в мае для обработки на последующие операции; Y_{0j} – вес алмазов, направленных со склада (после операции 0) в мае на операцию j , а S_i – суммарный вес алмазов, обработанных в мае на операции i и направленных для дальнейшей обработки на последующие операции.

Теперь можно написать основное балансовое соотношение для изучаемого промежутка времени (для мая) для операции j ¹¹:

$$\sum_{i=0}^5 W_{ij} = \sum_{l=1}^5 Y_{jl} + \Delta_j, \quad j = 1, \dots, 5. \quad (1)$$

Ниже мы преобразуем эти соотношения, введя параметры, формализующие взаимосвязи между весовыми характеристиками алмазов и полуфабрикатов на соседних операциях. Положим $k_{ij} = W_{ij}/Y_{ij}$ – среднестатистический коэффициент выхода, годного для алмазов, обработанных в мае на операции j с кодом предыдущей операции i (т.е. сначала на операции i , а потом сразу на j). Он вычисляется по фактическим данным с операционных нарядов-ведомостей; $\omega_{ij} = Y_{ij}/S_i$ – доля массы алмазов, поступивших после операции i на операцию j в мае в суммарном весе S_i алмазов, направленных после операции i на дальнейшие операции для обработки¹². Очевидно, что

$$W_{ij} = k_{ij} Y_{ij}, \quad i = 0, \dots, 5; j = 1, \dots, 5; \quad (2)$$

$$Y_{ij} = \omega_{ij} S_i, \quad i = 0, \dots, 5; j = 1, \dots, 5. \quad (3)$$

Используя (2) и (3), перепишем соотношение (1):

$$\sum_{i=0}^5 k_{ij} \omega_{ij} S_i = S_j + \Delta_j, \quad j = 1, \dots, 5. \quad (4)$$

Для дальнейшего анализа представим систему (4) в виде

$$S_j - \sum_{i=1}^5 k_{ij} \omega_{ij} S_i = -\Delta_j + k_{0j} \omega_{0j} S_0, \quad j = 1, \dots, 5. \quad (5)$$

Заметим, что если ввести обозначение $a_{ij} = k_{ij} \omega_{ij}$, $i = 0, \dots, 5; j = 1, \dots, 5$, то система уравнений (5) примет следующий вид:

$$S_j - \sum_{i=1}^5 a_{ij} S_i = -\Delta_j + a_{0j} S_0, \quad j = 1, \dots, 5. \quad (6)$$

Здесь уместно сделать два важных замечания для дальнейшего анализа.

¹¹ Оно описывает (формализует) вход на операцию j (с учетом предыдущей операции) плюс обработка на операции j и направление обработанных алмазов на непосредственные следующие операции, а также изменение при этом j -незавершенного производства.

¹² Параметры k_{ij} , ω_{ij} вычисляются по накопленным данным в конце мая. Подробнее об этом см. в разд. 8.

Замечание 1. Можно считать, что при каждом j ($j = 1, \dots, 5$) правая часть в (6) положительна, т.е. $-\Delta_j + a_{0j}s_0 = -\Delta_j + k_{0j}Y_{0j} > 0$. Это объясняется рядом обстоятельств. Во-первых, величина начального незавершенного производства D_j и ее изменение Δ_j являются регулируемыми величинами и их основное назначение – регулировать ритмичность процесса обработки алмазов после операции j . Поэтому в течение исследуемого периода (май) их всегда можно сделать достаточно небольшими по абсолютной величине, и в частности такими, чтобы величина $|\Delta_j|$ была существенно меньше строго положительной величины $a_{0j}s_0$ или, что то же самое, величины $k_{0j}Y_{0j}$. Более того, начальное j -незавершенное производство можно считать достаточно малой величиной, поскольку ее уменьшение можно компенсировать соответствующим увеличением величины Y_{0j} .

Замечание 2. Очевидно, что при $i, j = 1, \dots, 5$ величина $0 \leq k_{ij}\omega_{ij} < 1$ как произведение двух сомножителей, каждый из которых неотрицателен и меньше 1 в соответствии с его содержательным смыслом. Более того, известно, что для каждой пары (i, j) , где $i, j = 1, \dots, 5$, коэффициент $k_{ij} < 0,96$; причем на некоторых операциях обработки алмазов он достигает величины порядка 0,3–0,5. Этот феномен характерен для производства бриллиантов и свидетельствует о том, что на каждой операции в процессе обработки происходит монотонное уменьшение массы (веса) алмаза или полуфабриката. Это и неудивительно, поскольку форма исходного природного алмаза существенно отличается от получаемых из него бриллиантов, обладающих совершенством формы, специфической геометрией плоских граней и строго заданными углами их наклона, а также пропорциями между различными параметрами частей бриллианта.

Используя этот факт и обозначая $q = (\max_i k_{ij})$, , получаем для каждого столбца j :

$$\left| \sum_{i=1}^5 k_{ij}\omega_{ij} \right| = \sum_{i=1}^5 k_{ij}\omega_{ij} < \sum_{i=1}^5 (\max_i k_{ij})\omega_{ij} \leq \sum_{i=1}^5 q\omega_{ij} \leq q \sum_{i=1}^5 \omega_{ij} \leq q \times 1 = q < 1. \quad (7)$$

Это соотношение будет играть важную роль в дальнейшем анализе.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОГО ОТОБРАЖЕНИЯ

Рассмотрим отображение $y = xA$ пространства R^n в себя, задаваемое системой линейных уравнений:

$$y_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}x_i + b_j, \quad j = 1, \dots, n. \quad (8)$$

Определим в R^n расстояние $\rho(x, y)$ между точками x и y следующим образом:

$$\rho(x, y) = \max_{1 \leq i \leq n} |x_i - y_i|, \quad i = 1, \dots, n.$$

Нетрудно убедиться, что пространство R^n с так определенным расстоянием является полным метрическим пространством.

Покажем, что при

$$\sum_{i=1}^n |a_{ij}| \leq q < 1 \quad (9)$$

отображение (8) в пространстве (R^n, ρ) – сжимающее (сжатое). Действительно,

$$\begin{aligned} \rho(y^1, y^2) &= \max_j \left| \sum_{i=1}^n a_{ij}x_i^1 + b_j - \sum_{i=1}^n a_{ij}x_i^2 - b_j \right| = \\ &= \max_j \left| \sum_{i=1}^n a_{ij}(x_i^1 - x_i^2) \right| \leq \max_j \sum_{i=1}^n |a_{ij}| |x_i^1 - x_i^2| \leq \\ &\leq \max_j \sum_{i=1}^n |a_{ij}| \max_i |x_i^1 - x_i^2| = \rho(x^1, x^2) \max_j \sum_{i=1}^n |a_{ij}|. \end{aligned} \quad (10)$$

Из (10) следует, что если выполняется (9), то для любых двух точек $x^1, x^2 \in R^n$

$$\rho(x^1 A, x^2 A) = \rho(y^1, y^2) \leq q \rho(x^1, x^2), \quad 0 < q < 1. \quad (11)$$

Известно, что каждое сжимающее отображение в полном метрическом пространстве имеет одну и только одну неподвижную точку, т.е. существует единственная точка $x = (x_1, \dots, x_n)$ такая, что

$$x_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} x_i + b_j, \quad j = 1, \dots, n. \quad (12)$$

Это означает, что $|E - A| \neq 0$, т.е. определитель системы (12) не равен 0, и система (12) имеет решение¹³. Нетрудно убедиться, что эта система уравнений с точностью до обозначений совпадает с системой (6), описывающей (моделирующей) вход и выход в производстве бриллиантов и позволяющей вычислять и анализировать различные взаимосвязи между параметрами, характеризующими производство бриллиантов за фиксированный период времени. Однако, говоря о математическом соответствии систем (12) и (6), важно не забывать, что содержательный смысл системы (6) требует, чтобы решение системы (12) было неотрицательным. В связи с этим возникает вопрос о нахождении условий, гарантирующих неотрицательность решения системы (12).

6. ВЫЧИСЛЕНИЕ КВГ, СВОЙСТВА МАТРИЦЫ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Известно, что $0 \leq k_{ij} \omega_{ij} < 1$ для каждой пары индексов i, j ($i, j = 1, \dots, 5$) в силу содержательного смысла каждого из сомножителей k_{ij} и ω_{ij} (см. замечание 2). Полезно отметить, что при обработке достаточно большого массива исходного сырья алмазы проходят через все операции и нередко – не по одному разу. Очевидно, что большинство элементов матрицы A отлично от 0. Интуитивно это ясно, так как форма кристалла природного алмаза кардинально отличается от получаемых из него бриллиантов, ведь каждый кристалл алмаза неповторим, имеет свою специфику, геометрию (см. Приложение). И поэтому при обработке большого массива исходных алмазов используется каждая из 5 основных операций, причем все операции выполняют особую функцию. Далее применим построенную модель и систему соотношений (6) для вычисления КВГ, для чего следует обеспечить неотрицательность решения системы (6). В связи с этим введем вспомогательные инструментальные ненулевые элементы матрицы A , используя содержательный смысл параметров S_j, k_{ij}, ω_{ij} ($a_{ij} = k_{ij} \omega_{ij}$). Если $a_{ij} = 0$, это означает, что в рассматриваемый период через пару соседних операций (i, j) не прошел ни один полуфабрикат. Поскольку за месяц проходят обработку сотни тысяч алмазов, то это весьма редкое явление. Учитывая этот факт, положим для такой пары индексов (i, j) величину $W_{ij} = 0,1$ карата. Очевидно, что после такой чисто технической процедуры величина коэффициента ω_{ij} практически остается той же в силу его формального определения¹⁴ и содержательного смысла (его изменение, скорее всего, можно обнаружить в четвертом знаке после запятой). Величину k_{ij} для той же пары индексов можно положить равной средней по аналогичным коэффициентам строки i . Заметим, что при этом свойство (7) сохраняется. Более того, система уравнений (12), тесно связанная с системой (6), имеет единственное решение. В силу сказанного становится понятным, почему такие элементы мы назвали инструментальными.

Скорректированная таким образом матрица A является строго положительной, и в силу этого ее нельзя одновременной перестановкой строк и столбцов превратить в такую матрицу, где в левом или правом углу будет стоять нулевая квадратная подматрица меньшего размера. А это означает, что матрица A неразложима по терминологии линейных моделей (Гейл, 1963; Ашманов, 1984).

¹³ Отметим, что если выполняется (9), то система (12) всегда имеет единственное решение, независимо от знаков элементов a_{ij} .

¹⁴ Напомним, что ω_{ij} – доля массы алмазов, поступивших после операции i на операцию j в мае, в суммарном весе S_i алмазов, направленных после операции i на все дальнейшие операции для обработки. А производство бриллиантов построено так, что через любую операцию i ($i = 1, \dots, 5$) проходят практически все обрабатываемые алмазы, т.е. S_i измеряется многими тысячами карат. Вес алмаза измеряется в каратах с точностью до третьего знака после запятой. Поэтому можно считать, что изменение ω_{ij} произойдет после третьего знака после запятой.

7. ПРОДУКТИВНЫЕ МАТРИЦЫ И УСЛОВИЯ НЕОТРИЦАТЕЛЬНОСТИ РЕШЕНИЯ СИСТЕМ (12) И (6)

Рассмотрим неотрицательную квадратную $n \times n$ -матрицу $A = (a_{ij})$ и систему уравнений

$$x - xA = c, \quad x \geq 0. \quad (13)$$

Неотрицательную матрицу A называют *продуктивной*, если для любого вектора система уравнений (13) имеет неотрицательное решение (Ашманов, 1984).

Известен следующий достаточный признак продуктивности матрицы (Ашманов, 1984, с. 40). Если $n \times n$ -матрица A : 1) неотрицательна и неразложима, 2) сумма элементов каждой строки матрицы не больше 1 и хотя бы для одной строки строго меньше 1, то матрица A является продуктивной¹⁵.

Подведем некоторые итоги. Мы уже знаем, что 5×5 -матрица A с элементами $a_{ij} = k_{ij}\omega_{ij}$ положительна и (как показано выше) неразложима. В силу (7) свойство 2 из достаточного условия продуктивности матрицы A выполнено. Следовательно, для любой неотрицательной правой части системы уравнений (6) эта система имеет неотрицательное решение¹⁶. В частности, это верно и для правой части вида $\Delta_j + a_{0j}S_0$, которая положительна в силу замечания 1.

8. ИНФОРМАЦИОННАЯ БАЗА ПОСТРОЕННОЙ МОДЕЛИ

Система (6) моделирует взаимосвязи между показателями (характеристиками) процесса производства бриллиантов за анализируемый период времени. Более того, эта модель адекватно отражает сложившуюся технологию производства и ее ключевые элементы. Так, показатели k_{ij} , ω_{ij} являются объективными среднестатистическими характеристиками технологического процесса производства бриллиантов в исследуемый период времени и исчисляются по документам, которые ведут на производстве при обработке алмазов и полуфабрикатов на каждой операции производственного цикла. Найденные в результате обработки достаточно больших массивов алмазов, эти показатели обладают устойчивостью, если сохраняется структура обрабатываемого сырья. При этом предполагается, что технология производства и ее основные элементы (например, технология сортировки алмазов и квалификация технологов) не меняются в исследуемом периоде. Упомянутая устойчивость параметров неудивительна, поскольку в основе формирования этих параметров лежат такие тысячекратно повторяемые элементарные процедуры, как:

- взвешивание алмаза после каждой операции на электронных весах и фиксация его веса с точностью до третьего знака после запятой;
- изучение после любой операции каждого алмаза и фиксация непосредственно следующей операции, куда он направляется для обработки;
- фиксация этих результатов в документах, которые сопровождают процесс обработки алмазов вплоть до получения бриллиантов;
- сохранение первичной информации обо всех характеристиках для каждой пары соседних операций и их накопление в компьютерной базе данных (БД) за весь исследуемый период;
- вычисление указанных параметров k_{ij} и ω_{ij} по компьютерным программам на основе информации, накопленной в БД по формулам, характеризующим естественный смысл этих параметров.

Параметры ω_{ij} позволяют исчислить относительные величины и направления движения потоков алмазных полуфабрикатов для соседних операций. Значения k_{ji} описывают потери алмазного сырья при прохождении обработанных алмазов через пару соседних операций (i, j) , а величины

¹⁵ В приведенной теореме свойство 2 формулируется для строк матрицы A , в нашем случае она используется для ее столбцов. Это различие несущественно, поскольку, введя новые обозначения в модели вида $\bar{a}_{ji} = a_{ij}$, $\bar{k}_{ji} = k_{ij}$, $\bar{\omega}_{ji} = \omega_{ij}$, мы получим, что $\sum_{i=1}^n |\bar{a}_{ij}| = \sum_{i=1}^n |\bar{a}_{ij}| \leq q < 1$, т.е. (9) переформулировано для строк матрицы $\bar{A} = (\bar{a}_{ji})$.

¹⁶ Заметим, что такой же результат о неотрицательности решения системы (6) можно получить по теореме Фробениуса–Перрона о неотрицательных матрицах, не прибегая к аппарату продуктивных матриц.

Δ_j – уровень ритмичности процесса производства и формируются по фактическим начальным и конечным данным процесса производства.

Если исследуемый период времени достаточно протяженный и на нем обрабатываются достаточно крупные и представительные массивы алмазного сырья, то указанные выше среднестатистические показатели и другие параметры модели будут измерены адекватно, а данная модель станет существенным инструментом, который поможет исследовать разнообразные вопросы, формулируемые в рамках ее показателей.

Все это позволяет утверждать, что полученная в результате накопления фактических данных (о процессе переработки алмазов в бриллианты в течение длительного периода) система показателей k_{ij} и ω_{ij} , порождающая 5×5 -матрицу A , где $a_{ij} = k_{ij}\omega_{ij}$, а также величины a_{0j} , $k_{0j}\omega_{0j}$, где $j = 0, \dots, 5$, являются основательной БД предложенной модели¹⁷.

Система уравнений модели выглядит следующим образом:

$$x_j - \sum_{i=1}^5 a_{ij}x_i = b_j, \quad j = 1, \dots, 5, \quad (14)$$

где x_j соответствует величине S_j , а $b_j = -\Delta_j + a_{0j}S_0$. Нетрудно увидеть, что здесь имеется 5 уравнений, 5 неизвестных и 6 параметров ($\Delta_j, j = 1, \dots, 5$ и S_0), что в совокупности полностью описывает модель. Очевидно, задав эти параметры, можно однозначно (в силу сказанного выше) найти неотрицательные значения переменных x_i .

Покажем, как с помощью модели исчислить коэффициент выхода годного (КВГ), о котором говорилось в п. 2. Он определяется как отношение суммарной массы бриллиантов к массе алмазного сырья, затраченного на их изготовление. Эта величина обычно выражается в процентах. Во избежание громоздких рассуждений будем считать, что процесс производства происходил достаточно ритмично, и начальные и конечные размеры незавершенного производства остались неизменными, т.е. $\Delta_j = 0, j = 1, \dots, 5$. Это означает, что все алмазное сырье расходуется на выпуск готовой продукции. Вес готовой продукции (бриллиантов) составляет значение показателя $x_5(S_5)$ – суммарного веса ограненных бриллиантов. Масса затраченного на них алмазного сырья – S_0 . Если мы знаем значение S_0 – массы запущенного в производство сырья в начале исследуемого периода, коэффициенты k_{ij} и ω_{ij} , вычисленные по первичным документам за исследуемый период (т.е. для исследуемого периода мы знаем матрицу A и правую часть системы (14)), то, решив систему (6), найдем ее единственное решение, в частности положительное значение x_5 (поскольку $a_{0,5}S_0 > 0$). Тогда $\text{КВГ} = (x_5/S_0) \times 100\%$.

В принципе построенную модель можно использовать для решения других задач. Например, если мы хотим узнать, сколько надо запустить в производство алмазов, чтобы выйти на заранее заданную величину конечной массы M полученных бриллиантов, то надо соответственно положить $x_5 = M$ и в рамках модели (14) найти неизвестное S_0 . Разумеется, в этом случае считаем, что структура обрабатываемых алмазов остается той же, при которой формировалась БД модели.

9. ВЫВОДЫ

Проведенные расчеты КВГ при массовом производстве круглых бриллиантов на Московском заводе “Кристалл” из различных типов алмазов (в рамках сложившейся технологии производства) показали, что значение КВГ никогда не превышало 45%, и даже для алмазов с хорошей геометрией формы, как правило, находилось на уровне 35–40%. Предложенные нами методы оптимального использования октаэдрических алмазов для производства из каждого кристалла алмаза бриллиантов максимальной стоимости нередко обнаруживали ситуации, когда надо было сознательно уменьшить КВГ для повышения суммарной стоимости получаемых из кристалла алмаза круглых бриллиантов.

¹⁷ Заметим, что для построения БД модели крупномасштабного производства, каким был Московский завод “Кристалл”, достаточно накопить соответствующие показатели за 2 недели, а потом использовать модель для расчетов в рамках более длительного периода, например месяца, или более.

Становится ясно, что потенциальные резервы повышения эффективности использования природных алмазов на производстве круглых бриллиантов связаны с совершенствованием сложившихся технологий их производства.

Здесь можно указать на ряд направлений для совершенствования технологии. Даже в рамках сложившейся технологии производства существуют ограничения, преодоление которых может дать эффект. Речь идет о том, что в кристалле есть мягкие и жесткие направления обработки, причем жесткие связаны не только со снижением производительности при обработке алмазов, но и с возможностью разрушения кристалла при обработке. Мягкие – направления обработки, где отклонение от кристаллографической оси четвертого порядка не превышает угла в 13 градусов (Фридман, Бабат, 2005). Именно в этом диапазоне при существующей технологии производства выбирается положение “оси вращения” будущего круглого бриллианта. Расширение этого диапазона¹⁸ может дать эффект, если будут разработаны надежные методы обработки алмазов в жестких направлениях.

Революция же в повышении КВГ может произойти, если будут созданы методы обработки (производства бриллиантов), при которых то, что сегодня идет в отходы, может стать источником производства новых бриллиантов. Некоторое время назад проводились работы, которые носили условное название “термохимия”, – где предполагалось, что кристалл природного алмаза будет подвергаться такому воздействию, когда из алмаза можно будет “вырезать” круглый бриллиант при сохранении целостности оставшейся части кристалла (или его значительной части). Пока на этом пути крупных сдвигов не достигнуто. Другое “полуфантастическое” направление связано с возможностью повторного превращения “алмазных отходов” в натуральный кристалл с использованием таких “первичных факторов образования природных алмазов”, как высокие температура и давление, при которых алмазы когда-то образовывались в природе. Такой путь используется уже сейчас при создании синтетических алмазов. Здесь речь идет о возможности повторного использования частей природных алмазов для создания из них более крупных алмазов естественного формата. При этом предполагается, что затраты на реализацию проекта должны окупаться за счет создания соответствующего продукта с высокой стоимостью.

Сейчас происходит быстрое истощение известных крупных алмазных месторождений (действующие известные крупные месторождения находятся в весьма преклонном возрасте), и долгое время (более 25 лет) не было открыто ни одного крупного месторождения алмазов. При этом небольшие новые или имеющиеся месторождения не в состоянии компенсировать истощения запасов крупных месторождений. Вместе с тем спрос на ювелирные природные алмазы растет и будет расти (в частности в силу перспектив развития алмазо-бриллиантового рынка в Китае и Индии). Поэтому проблема повышения эффективности использования природных алмазов становится исключительно важной. Достаточно заметить, что повышение КВГ означает возможность производства (без дополнительных затрат алмазов!) новых бриллиантов и ювелирных изделий из них, что позволит удовлетворить спрос, не увеличивая добычу природных алмазов. Революция в технологии производства бриллиантов, позволяющая существенно повысить КВГ, является фактическим эквивалентом открытия новых крупных месторождений алмазов, о необходимости которых говорят в последнее время ученые, аналитики и руководители крупнейших алмазодобывающих компаний.

ПРИЛОЖЕНИЕ

1. Октаэдрические многогранники (алмазы октаэдрической формы). Если в многограннике, изображенном на рис. 2, сдвинуть параллельно самой себе плоскость, содержащую грань AED , направляя ее движение вовне многогранника, т.е. в направлении внешней нормали к AED (сдвигаемая плоскость переходит в плоскость, содержащую грань $A'E'D'$ нового многогранника), то мы получим многогранник $A'E'D' AEDBFC$, изображенный на рис. 3.

Замечание. В новом многограннике $A'E'D' AEDBFC$, помимо вершин исходного многогранника, появятся 3 новых вершины $A'E'D'$, в которых:

¹⁸ Об этом говорят вычислительные эксперименты, теория и практика оптимальной обработки алмаза в рамках существующей технологии производства, показывающие, что оптимум, как правило, достигается на границе мягких направлений (Фридман, Бабат, 2005).

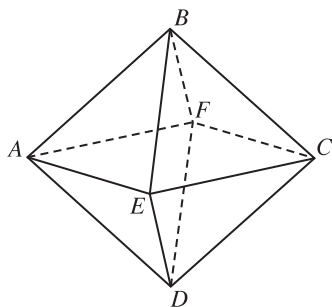


Рис. 2. Правильный (идеальный) октаэдрический многогранник $AEDBFC$

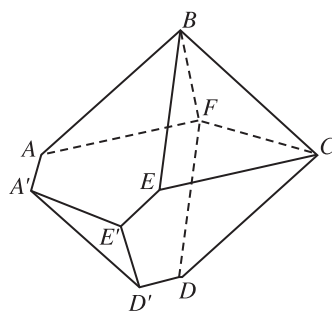


Рис. 3. Октаэдрический многогранник $A'E'D'AEDBFC$

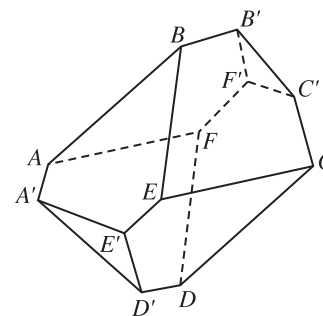


Рис. 4. Октаэдрический многогранник $A'E'D'AEDBFCB'F'C'$

а) ребро AA' будет частью прямой, являющейся пересечением плоскостей, содержащих грани AFD и ABE многогранника $AEDBFC$ (грани AFD и ABE многогранника $AEDBFC$ расширятся при этом до граней $A'AFDD'$ и $A'ABEE'$ многогранника $A'E'D'AEDBFC$);

б) ребро EE' будет частью прямой, являющейся пересечением плоскостей, содержащих грани ABE и CDE многогранника $AEDBFC$ (грани ABE и CDE многогранника $AEDBFC$ расширятся при этом до граней $A'ABEE'$ и $E'ECDD'$ многогранника $A'E'D'AEDBFC$);

в) ребро DD' будет частью прямой, являющейся пересечением плоскостей, содержащих грани ECD и AFD многогранника $AEDBFC$ (грани ECD и AFD многогранника $AEDBFC$ расширятся при этом до граней $E'ECDD'$ и $A'AFDD'$ многогранника $A'E'D'AEDBFC$);

Если в многограннике $A'E'D'AEDBFC$ (см. рис. 3) сдвинуть параллельно самой себе плоскость, содержащую грань BFC , снова двигаясь вовне многогранника, т.е. в направлении внешней нормали грани BFC (сдвигаемая плоскость переходит в плоскость грани нового многогранника), то получим октаэдрический многогранник $A'E'D'AEDBFCB'F'C'$, изображенный на рис. 4.

Изображенные на рис. 3 и 4 октаэдрические многогранники – реальные и далеко не самые сложные кристаллы алмаза октаэдрического типа.

2. Круглый бриллиант и его геометрия. Для более детального представления геометрии круглого бриллианта (КБ) приведем проекции КБ (рис. 5).

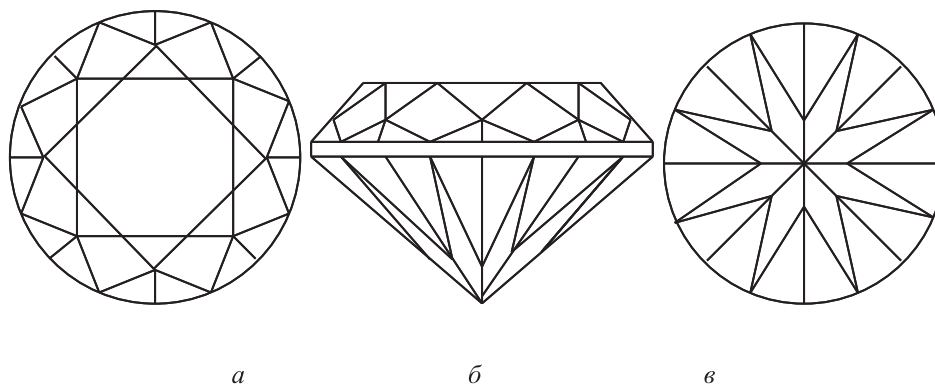


Рис. 5. Вид круглого бриллианта: а) сверху; б) сбоку; в) снизу

Отметим, что при изготовлении круглого бриллианта следует строго соблюдать ряд пропорций и параметров, выработанных практикой. Они касаются величин наклона разных граней, размеров частей бриллианта, в частности толщин верхней, средней и нижней частей относительно диаметра рундиста (средней части бриллианта в виде цилиндрического пояса), который выделен на рис. 5б и разделяет верх и низ бриллианта.

Приведенные здесь изображения октаэдрических многогранников (даже без учета наличия, формы и расположения в них дефектов) и круглого бриллианта дают представления о геометрической сложности и индивидуальных особенностях таких объектов. Все это в комплексе объясняет многообразие маршрутов обработки алмазов и их длины (за счет возможности возврата назад на некоторые операции), необходимых для получения в результате обработки уникального конечного продукта – бриллианта, удовлетворяющего всем требованиям к его геометрическим параметрам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ашманов С.А.** (1984): Введение в математическую экономику. М.: Наука.
- Гейл Д.** (1963): Теория линейных экономических моделей М.: ИЛ.
- Бабат Л., Фридман А.** (2008): Параллельные вложения октаэдрических многогранников // *Дискретная математика*. Т. 20. Вып. 2.
- Пенни Г.** (2010): [Электронный ресурс] Дайджест СМИ 28.04.2010 (R&P). Режим доступа: <http://www.rough-polished.com>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: декабрь 2010 г.).
- Похиленко Н.П.** (2007): В ближайшие пять лет мировая добыча алмазов упадет на 25% [Электронный ресурс] Интервью. 25.07.2007. Режим доступа: <http://www.rough-polished.com>, свободный. Загл. с экрана. Яз. рус. (дата обращения: декабрь 2010 г.).
- Фридман А.** (2009): Мировой алмазный рынок и Россия. М.: ЦЭМИ.
- Фридман А., Бабат Л.** (2005): Оптимальное вложение бриллианта в алмаз и стоимостная оценка алмаза. Препринт WP/2005/189. М.: ЦЭМИ РАН.
- Черепанова М.** (2010): Бриллиантовый бренд // *Эксперт*. № 16–17 (702).
- Even-Zohar Ch.** (2010): Summaries the Last Decade in the World Diamond Industry [Электронный ресурс] Newsletter № 61. February. Режим доступа: <http://www.israelidiamond.co.il>, свободный. Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: декабрь 2010 г.).
- Jance A.J.A. (Bram)** (2007): Global Rough Diamond Production Since 1870 // *Gems&Gemology*. Vol. 43 (2). Summer.
- U.S. Geological Survey Minerals Yearbook (2000–2008): Washington: US Department of the Interior.

Поступила в редакцию
06.12.2010 г.

The Problem of Efficient Usage of Rough Diamonds: Modern Context

A.A. Fridman

The world amount of raw diamond mining is falling and no new sources discovered, while the demand for the raw diamonds is growing. These factors make the issue of efficient use of raw diamonds extremely important. The Input-Output model is constructed for the production of diamonds with unique system of raw diamond processing. The model allows calculating the weight loss of the raw diamonds (taking into account the high unit cost and rarity) in the process of production. The properties of the model are investigated; the existence, uniqueness and non-negativity of its solution proved. Since “production wastes” exceed 50% of the initial raw diamond weight, new processing technologies are required.

Keywords: raw diamond, diamond, model, solution, efficiency of production.