

В статье представлены методы прогнозирования остаточного ресурса безопасной эксплуатации оборудования, основанные на определении закономерностей развития дефектов и повреждений, статистической обработке данных, экстраполяции трендов до предельно допустимых значений и вероятностной оценке значений показателей.

**Ключевые слова:** методы оценки и прогнозирования ресурса, остаточный ресурс.

**Контактная информация:** e-mail goericke@kemsr.ru.

**ГЕРИКЕ Борис Львович**  
Профессор КузГТУ,  
доктор техн. наук

**ГЕРИКЕ Павел Борисович**  
Преподаватель КузГТУ

**ЕЩЕРКИН**  
**Павел Владимирович**  
Соискатель КузГТУ

# Математическая модель оценки фактического состояния бурового станка

Необходимость определения остаточного ресурса возникает при планировании периодичности контроля за техническим состоянием оборудования с целью обеспечения безопасности его эксплуатации, и продления срока службы оборудования при исчерпании назначенного ресурса. Как правило, при оценке остаточного ресурса используются упрощенные подходы, не учитывающие случайного характера процессов деградации параметров технического состояния оборудования и не оценивающие достоверность прогноза.

Более точные методы прогнозирования остаточного ресурса безопасной эксплуатации основаны на определении закономерностей развития дефектов и повреждений, статистической обработки данных, экстраполяции трендов до предельно допустимых значений и вероятностной оценке значений показателей.

Результаты исследования усталостного разрушения подшипников [1] показали, что с практической точки зрения для построения эффективной диагностической модели деградации рассматриваемых объектов наибольший интерес представляют следующие этапы: нормальная эксплуатация, одиночные зарождающиеся дефекты, интенсивный износ (см. рисунок).

Методы оценки и прогнозирования ресурса оборудования делят на четыре группы [2]: детерминированные, экспертные, физико-статистические и фактографические.

В детерминированных методах используют аналитические зависимости, связывающие время до отказа объекта с характеристиками эксплуатационных нагрузок и параметрами физико-химических процессов. Однако эти методы не учитывают случайного характера нагрузок и изменений в материалах.

Экспертные методы предполагают наличие квалифицированных специалистов разных профилей, проводящих экспертизу.

Физико-статистические методы при оценке ресурса учитывают как влияние разнообразных физико-химических факторов, способствующих развитию деградационных процессов, так и действующих эксплуатационных нагрузок.

Из известных фактографических методов, базирующихся на данных об объекте прогнозирования и его прошлом развитии, для прогнозирования остаточного ресурса оборудования в основном используются две группы методов:

- статистические, основанные на статистической обработке данных об отказах и ресурсах аналогов;
- экстраполяционные, основанные на анализе тренда параметров технического состояния диагностируемого оборудования.

Математическая модель оценки фактического состояния объекта строится на основе следующих условий и допущений [2, 3]. Имеющаяся на данный момент совокупность технических параметров (образующих пространство технических параметров) объекта зависит:

- от начального состояния объекта;
- от режима функционирования объекта;
- от истории условий эксплуатации;
- от режимов работы.

Под условиями эксплуатации в данном случае следует понимать рабочие нагрузки, систематические и случайные факторы внешних воздействий и т.п.

Под режимом работы объекта подразумевается развертка во времени набора технических и технологических процессов, каждый из которых характеризуется совокупностью рабочих параметров.

Изменение технических параметров объекта можно описать уравнением состояния, которое может задаваться эволюционным или дифференциальным уравнением — детерминированным или стохастическим в зависимости от входящих в правую часть величин:

$$x(t) = F\{x(t_0), u_{t_0, t}, K\}$$

О совокупности технических параметров объекта можно судить по результатам прямых или косвенных измерений диагностических характеристик, совокупность которых зависит от фактического состояния объекта на момент проведения измерений и условий, в которых они проводились. Уравнение измерений имеет в силу своей природы стохастический характер:

$$y(t) = G[x(t_0), u(t)]$$

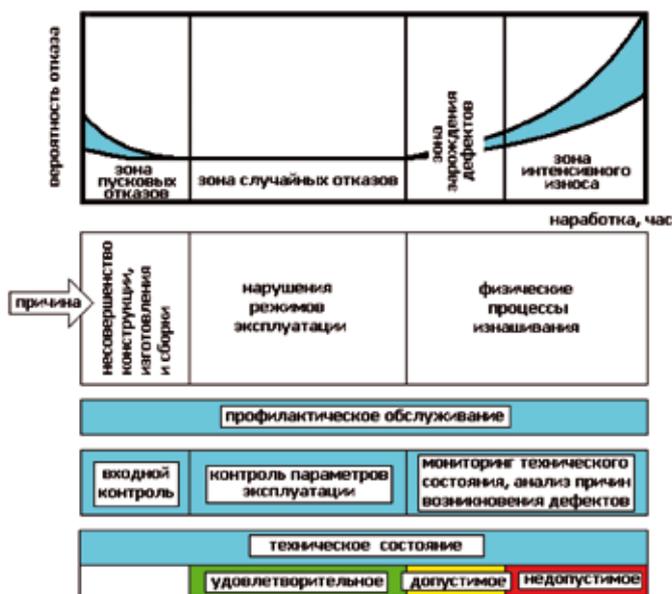


График зависимости вероятности возникновения отказа от наработки и влияние системы профилактического обслуживания на показатели надежности изделия

По полученной совокупности измерений строится оценка истинных значений технических параметров объекта. Этот процесс можно описать детерминированным уравнением оценок:

$$\hat{x}(t) = Hy(t)$$

Далее оценивается фактическое состояние объекта (вектор в пространстве состояний), о котором судят по совокупности оценок истинных значений технических параметров объекта, полученных в данных условиях [4]:

$$\Phi(t) = \Psi[\hat{x}(t), u(t)]$$

В этом случае остаточный ресурс объекта рассчитывается по построенной математической модели и определяется совокупностью оценок технических параметров объекта, уравнением состояния, условиями эксплуатации, фактическим состоянием объекта и совокупностью предельных технических параметров

$$R(t) = W[t, \hat{x}(t), u(t), \bar{x}, \Phi(t)]$$

В уравнениях (1) — (5) приняты следующие обозначения:  $x(t)$  — вектор технических (диагностических) параметров;  $u(t)$  — условия эксплуатации объекта в текущий момент времени;  $u_{[t_0, t]}$  — условия эксплуатации объекта на промежутке времени  $[t_0, t]$ ;  $K$  — вектор, характеризующий режим работы объекта;  $y(t)$  — результаты диагностических измерений;  $\hat{x}(t)$  — оценка вектора технического состояния;  $\Phi(t)$  — оценка фактического состояния объекта в момент времени  $t$ ;  $R(t)$  — оценка остаточного ресурса в момент времени  $t$ ;  $\bar{x}$  — предельные значения технических параметров. При этом за  $t_0$  в уравнении (1) должен приниматься момент начала эксплуатации объекта, а при определении остаточного ресурса — момент оценки технического состояния объекта.

Поскольку результаты диагностических измерений являются случайными величинами, то описанную модель нельзя считать полностью детерминированной, поэтому необходимо использовать статистические закономерности измерений и их стохастические связи с показателями фактического состояния объекта диагностики. По сути, оценка истинных значений технических параметров в соответствии с уравнением (3) является задачей распознавания состояния, в котором находится объект диагностики, для решения которой может быть применен вероятностный подход [5]. Если по параметру технического состояния нет ретроспективных данных, то рекомендуется накапливать и обрабатывать данные по аналогам.

При неизвестном законе распределения для наработки до отказа должны определяться точечные оценки среднего и гамма-процентного ресурсов и их нижние доверительные границы.

**Точечная оценка среднего остаточного ресурса:**

$$T_0(t) = \sum_{i=k+1}^N \left[ \frac{z_i}{[r \cdot K_N(t)]} \right]$$

где:  $z_i = t_i - t$ ;  $t$  — время эксплуатации, после которого стали исследовать группу однотипного оборудования;  $t_i$  — время отказа  $i$ -й единицы оборудования;  $N$  — число единиц оборудования;  $k$  — число отказавших единиц оборудования до момента времени  $t$ ;  $r = N - k$ ;  $K_N(t) = 1 - [1 - P_0(t)]^N$ ;  $P_0(t) = 1 - \frac{k}{N}$  — точечная оценка вероятности безотказной работы.

В том случае, если на интервале  $[t_0, t]$  отказ получили  $s$  изделий, то точечная оценка среднего остаточного ресурса определяется как:

$$T_0(t) = \frac{\sum_{i=1}^s z_i + (r - s)t_0}{r}$$

Нижняя доверительная граница среднего остаточного ресурса:

$$T_1 = \frac{T_0(t)}{1 + \frac{u_q}{\sqrt{r}}}$$

где  $u_q$  — квантиль нормированного нормального закона ( $q = 0,8; 0,9; 0,95, 0,99$ ).

**Точечная оценка гамма-процентного остаточного ресурса:**

$$T_\gamma^0(t) = z_{m-1} + \frac{(z_{m-1} - z_m)[\gamma - R_0(z_{m-1})]}{R_0(z_{m-1}) - R_0(z_m)}$$

где  $z_1 < \dots < z_m < \dots$  — вариационный ряд остаточных наработок, для  $z_m, z_{m-1}$   $R_0(z_m) \leq \gamma < R_0(z_{m-1})$ ;  $R_0(z)$  — оценка вероятности безотказной работы для остаточного ресурса;  $R_0(z) = (r - s) / r$ ;  $s$  — число отказавших изделий за время  $z$  после  $t$ .

**Нижняя доверительная граница гамма-процентного остаточного ресурса**

$$T_{\gamma q}^0 = \frac{T_\gamma^0(t)}{1 + u_q f(r, \gamma)}$$

где

$$f(r, \gamma) = \frac{\left[ \frac{1}{\gamma} - 1 \right]^{0,5}}{r^{0,5} \ln \frac{1}{\gamma}}$$

Использование формул (6) — (11) рекомендуется в том случае, если время эксплуатации изделия заметно меньше среднего ресурса.

Прогнозирование остаточного ресурса сложных систем, эксплуатируемых в рамках реактивного обслуживания, не имеет практической ценности, поэтому в дальнейшем будем рассматривать только плановую и активную стратегии обслуживания.

В рамках планово-предупредительных ремонтов сроки эксплуатации и межремонтный период строго регламентированы, и перед специалистом, выполняющим диагностику, ставится лишь один вопрос: проработает ли диагностируемая система до очередного ремонта или нужны незамедлительный останов и замена. В этом случае прогнозирование должно выполняться на незначительном интервале времени — от момента диагностики до очередного ремонта.

При обслуживании оборудования по фактическому состоянию (активное обслуживание) четких сроков вывода в ремонт не существует, поэтому выполнение долгосрочного прогнозирования жизненно необходимо, так как позволяет не только оценить примерное время выхода из строя, но и заблаговременно подготовиться к его ремонту.

Таким образом, для эффективной работы диагностической системы в условиях использования различных форм технического обслуживания и ремонта необходимо на основании накопленной статистики решить три основные задачи:

- разработать алгоритм выделения тренда,
- разработать алгоритм долгосрочного прогнозирования;
- разработать алгоритм краткосрочного прогнозирования.

*Список литературы*

1. Методические рекомендации по проведению диагностических виброизмерений ЦКМ и ЦНА предприятий МХНП СССР. Москва, Интертехдиагностика, 1991. — 53 с.
2. Ключев В. В. Подходы к построению систем оценки остаточного ресурса технических объектов. / В. В. Ключев, А. С. Фурсов, М. В. Филинов. // Контроль. Диагностика. — 2007. — №3. — С. 18-23
3. Безопасность России. — М.: МГФ «Знание». — 1998. — 397 с.
4. Пронилов А. С. Надежность машин. — М.: Машиностроение. — 1978. — 390 с.
5. Краковский Ю. М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. — Новосибирск: Наука. — 2005. — 360 с.

# УГОЛЬ

МИНИСТЕРСТВА ЭНЕРGETИКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

[WWW.UGOLINFO.RU](http://WWW.UGOLINFO.RU)

## 2-2010

Лучший мировой опыт  
в комплексном решении вопросов  
по шахтному метану  
[info@Demeta.net](mailto:info@Demeta.net)

Мобильная ТЭС в Кузбассе



## консорциум фирм **Atec + Demeta + Pro2**

совместно с госинститутом ФРГ мы участвуем  
в НИОКР ЕС по утилизации шахтного газа  
(сжижение газа и когенерация с  $\text{CH}_4$  менее 25%)

Мобильная ТЭС в Украине



За 15 лет в страны СНГ  
поставлены 10 мобильных мини ТЭС  
на шахтном метане.

В 2009 г. работали только 5 из них,  
все 5 от нас!

Шахты получают не только  
электро- и теплоэнергию,  
но и эмиссионные сертификаты

**Главный редактор**  
**АЛЕКСЕЕВ Константин Юрьевич**  
 Директор Департамента угольной  
 и торфяной промышленности  
 Минэнерго России

**Заместитель главного редактора**  
**ТАРАЗАНОВ Игорь Геннадьевич**  
 Генеральный директор  
 ООО «Редакция журнала «Уголь»  
 тел.: (495) 236-95-50

**Редакционная коллегия**

**АРТЕМЬЕВ Владимир Борисович**  
 Директор ОАО «СУЭК», доктор техн. наук

**БАСКАКОВ Владимир Петрович**  
 Генеральный директор ОАО ХК «СДС-Уголь»,  
 канд. техн. наук

**ВЕСЕЛОВ Александр Петрович**  
 Генеральный директор

ФГУП «Трест «Арктикуголь»,  
 канд. техн. наук

**ЕВТУШЕНКО Александр Евдокимович**  
 Председатель Совета директоров  
 ОАО «Мечел»,  
 доктор техн. наук, профессор

**ЕЩИН Евгений Константинович**

Ректор КузГТУ,  
 доктор техн. наук, профессор

**ЗАЙДЕНВАРГ Валерий Евгеньевич**

Председатель Совета директоров ИНКРУ,  
 доктор техн. наук, профессор

**КОЗОВОЙ Геннадий Иванович**

Генеральный директор  
 ЗАО «Распадская угольная компания»,  
 доктор техн. наук, профессор

**КОРЧАК Андрей Владимирович**

Ректор МГГУ,  
 доктор техн. наук, профессор

**ЛИТВИНЕНКО Владимир Стефанович**

Ректор СПГИ (ТУ),  
 доктор техн. наук, профессор

**МАЗИКИН Валентин Петрович**

Первый зам. губернатора Кемеровской  
 области, доктор техн. наук, профессор

**МАЛЫШЕВ Юрий Николаевич**

Президент НП «Горнопромышленники  
 России» и АГН, доктор техн. наук,  
 чл.-корр. РАН

**МОХНАЧУК Иван Иванович**

Председатель Росуглепрофа, канд. экон. наук

**ПОПОВ Владимир Николаевич**

Доктор экон. наук, профессор

**ПОТАПОВ Вадим Петрович**

Директор ИУУ СО РАН,  
 доктор техн. наук, профессор

**ПУЧКОВ Лев Александрович**

Президент МГГУ,  
 доктор техн. наук, чл.-корр. РАН

**РОЖКОВ Анатолий Алексеевич**

Директор по науке  
 и региональному развитию ИНКРУ,  
 доктор экон. наук, профессор

**РУБАН Анатолий Дмитриевич**

Зам. директора УРАН ИПКОН РАН,  
 доктор техн. наук, чл.-корр. РАН

**СУСЛОВ Виктор Иванович**

Зам. директора ИЗОПП СО РАН, чл.-корр. РАН

**ТАТАРКИН Александр Иванович**

Директор Института экономики УрО РАН,  
 академик РАН

**ХАФИЗОВ Игорь Валерьевич**

Управляющий директор ОАО ХК «Якутуголь»

**ЩАДОВ Владимир Михайлович**

Вице-президент ЗАО «ХК «СДС»,  
 доктор техн. наук, профессор

**ЯКУТОВ Василий Владимирович**

Директор ОАО «УК «Кузбассразрезуголь»

# ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в октябре 1925 года

**УЧРЕДИТЕЛИ**  
 МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ  
 РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА «УГОЛЬ»

**ФЕВРАЛЬ**

**2-2010** /1008/

# УГОЛЬ

## СОДЕРЖАНИЕ

| РЕСУРСЫ  | RESOURCES                    |
|--|------------------------------|
| Твердов А. А., Яновский А. Б., Никишичев С. Б., Г. Апель<br><b>Профилактика и ликвидация горения породных отвалов</b> _____  | 3                            |
| <i>Preventive maintenance and liquidation of burning pedigre</i>   |                              |
| Стародубов А. Н., Зиновьев В. В., Дорофеев М. Ю.<br><b>Определение рациональной планировки энерготехнологического комплекса Кузбасса</b><br><b>методом имитационного моделирования</b> _____   | 8                            |
| <i>Definition of a rational lay-out power and technological a complex of Kuzbass a method of imitating modeling</i>  |                              |
| <b>ОАО «Шахта «Заречная» (УК «Заречная») в 2009 г. выдало на-гора более 5 млн тонн угля —</b><br><b>впервые в истории предприятия</b> _____  | 12                           |
| <i>OJSC «Mine «Zarechnaja» in 2009 has given out to the surface more than 5 million tons of coal —</i><br><i>for the first time in history of the enterprise</i>   |                              |
| Балакина Г. Ф., Котельников В. И., Куликова М. П.<br><b>Проблемы использования энергетических ресурсов Республики Тыва</b> _____   | 15                           |
| <i>Problems of use power resources of Republic Tyva</i>  |                              |
| БЕЗОПАСНОСТЬ   | SAFETY                       |
| Артемьев В. Б., Рубан А. Д., Забурдяев В. С., Ютяев Е. П.<br><b>Промышленный регламент технологии извлечения и утилизации шахтного метана</b><br><b>в процессе разработки высокогазоносных угольных пластов подземным способом</b> _____ | 18                           |
| <i>The industrial rules of technology of extraction and recycling of mine methane in development of highly gas coal</i><br><i>layers by underground way</i>  |                              |
| Пацков Е. А., Сторонский Н. М., Хрюкин В. Т., Фалин А. А., Коряга М. Г.<br><b>Рациональное использование каптируемого шахтного метана на шахтах Кузнецкого бассейна</b> _____  | 22                           |
| <i>Rational use of taken mine methane on mines of Kuznetsk</i>   |                              |
| Киряева Т. А., Родин Р. И.<br><b>К вопросу о механизме возникновения высоких температур при разработке угольных пластов</b> _____  | 27                           |
| <i>To a question on the mechanism of occurrence of heats by development of coal layers</i>   |                              |
| СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ   | SOCIAL AND ECONOMIC ACTIVITY |
| Грибин Ю. Г., Попов В. Н., Мохначук И. И., Ефимова Г. А.<br><b>Разработка методических рекомендаций по совершенствованию социальной защиты</b><br><b>работников угольной отрасли</b> _____   | 30                           |
| <i>Development of methodical recommendations on perfection of social protection</i><br><i>of workers of coal branch</i>  |                              |
| ПОДЗЕМНЫЕ РАБОТЫ   | UNDERGROUND MINING           |
| Фрянов В. Н., Павлова Л. Д.<br><b>Перспективные направления исследования технологии подземной угледобычи</b> _____   | 36                           |
| <i>Perspective directions of research of technology of underground mining</i>  |                              |
| Козлов В. В.<br><b>Методика исследования автоматизированного решения разворота очистного забоя</b> _____   | 42                           |
| <i>Technique of research of the automated decision of a turn of a lava</i>   |                              |
| ГОРНЫЕ МАШИНЫ  | COAL MINING EQUIPMENT        |
| Герике Б. Л., Герике П. Б., Ещеркин П. В.<br><b>Математическая модель оценки фактического состояния бурового станка</b> _____  | 45                           |
| <i>Mathematical model of an estimation of an actual condition of the chisel machine tool</i>   |                              |
| Неделько А. Ю.<br><b>Новые методы измерения физических величин в условиях производства</b> _____   | 47                           |
| <i>New methods of measurement of physical sizes in conditions of manufacture</i>   |                              |
| ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ORGANIZATION OF MANUFACTURE   |                              |
| Федоров В. Н.<br><b>К вопросу о техническом регулировании производственных процессов современной шахты</b> _____   | 49                           |
| <i>To a question on technical regulation of productions of modern mine</i>   |                              |

## ООО «РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА «УГОЛЬ»

119991, г. Москва,  
Ленинский проспект, д. 6, стр. 3, офис Г-136  
Тел./факс: (495) 236-95-50  
E-mail: ugol1925@mail.ru  
E-mail: ugol@land.ru

### Генеральный директор

**Игорь ТАРАЗАНОВ**

**Ведущий редактор**

**Ольга ГЛИНИНА**

**Научный редактор**

**Ирина КОЛОБОВА**

**Менеджер**

**Ирина ТАРАЗАНОВА**

**Ведущий специалист**

**Валентина ВОЛКОВА**

### ЖУРНАЛ ЗАРЕГИСТРИРОВАН

Федеральной службой по надзору  
в сфере связи и массовых коммуникаций.  
Свидетельство о регистрации  
средства массовой информации  
ПИ № ФС77-34734 от 25.12.2008 г

### ЖУРНАЛ ВКЛЮЧЕН

в Перечень ведущих рецензируемых научных  
журналов и изданий, в которых должны быть  
опубликованы основные научные результаты  
диссертаций на соискание ученых степеней  
доктора и кандидата наук, утвержденный  
решением ВАК Минобразования и науки РФ

### ЖУРНАЛ ПРЕДСТАВЛЕН

в Интернете на веб-сайте

**www.ugolinfo.ru**

и на отраслевом портале  
"РОССИЙСКИЙ УГОЛЬ"

**www.rosugol.ru**

### НАД НОМЕРОМ РАБОТАЛИ:

*Ведущий редактор*

*О.И. ГЛИНИНА*

*Научный редактор*

*И.М. КОЛОБОВА*

*Корректор*

*А.М. ЛЕЙБОВИЧ*

*Компьютерная верстка*

*Н.И. БРАНДЕЛИС*

*Подписано в печать 09.02.2010.*

*Формат 60x90 1/8.*

*Бумага мелованная.*

*Печать офсетная.*

*Усл. печ. л. 9,0 + обложка.*

*Тираж 3150 экз.*

*Отпечатано:*

*РПК ООО «Центр*

*Инновационных Технологий»*

*119991, Москва, Ленинский пр-т, 6*

*Тел.: (495) 236-97-86, 236-95-67*

*Заказ 2655/К*

© ЖУРНАЛ «УГОЛЬ», 2010

## ГЕОЛОГИЯ

GEOLOGY

Мавренков А. В.

**Геологический прогноз и автоматическая система контроля на угольных шахтах** \_\_\_\_\_ 52  
*Geological forecast and the automatic monitoring system for collieries*

## ХРОНИКА

CHRONICLE

**Хроника. События. Факты** \_\_\_\_\_ 53  
*Chronicle. Events. Facts*

## ЭКОЛОГИЯ

ECOLOGY

Зеньков И. В.

**Результаты исследований поверхностей внешних отвалов, рекультивированных угольным  
разрезом «Бородинский» для сельскохозяйственного использования** \_\_\_\_\_ 61  
*Results of researches of surfaces external re-cultivation a coal cut «Borodinskij» for agricultural use*

## ЗА РУБЕЖОМ

ABROAD

**Зарубежная панорама** \_\_\_\_\_ 66  
*World mining panorama*

## СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

HISTORICAL PAGES

**След в истории (к 100-летию со дня рождения Шибалева Василия Тихоновича)** \_\_\_\_\_ 69  
*Trace in history*

**Вспомним всех поименно... (о Чернегове Александре Степановиче)** \_\_\_\_\_ 70  
*Let's recollect all by name ...*

**Горный генеральный директор I ранга  
(к 100-летию со дня рождения Миндели Элизбара Онисимовича)** \_\_\_\_\_ 72  
*Mining general director I of a rank*

### Подписные индексы:

- Каталог «Газеты. Журналы» Роспечати  
**71000, 71736, 73422, 71737, 79349**

- Объединенный каталог «Пресса России»  
**87717, 87776, 87718, 87777**