

Приходько И.Ю., Воробей С.А., (Институт черной металлургии Национальной академии наук Украины),  
Шатохин С.Е. (Лехлер, Германия),  
Лебедев С.А., Казаков И.В. (ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»).

## **Методология научно-технического аудита системы охлаждения валков широкополосного стана горячей прокатки**

Температурный режим эксплуатации валков является одним из важнейших факторов, определяющих качество полосового проката. В связи с постоянным повышением требований потребителей к точности поперечного сечения полос, их плоскостности и качеству поверхности, в последние годы значительное внимание стали уделять этому вопросу. Кроме того, стремление в последнее время перейти на использование рабочих валков из быстрорежущей стали с повышенной износостойкостью обозначило проблему удовлетворения высоких требований к температурному режиму их эксплуатации. Серьезное изменение системы охлаждения валков требуют проведения специальных предварительных обследований существующего положения, то есть проведения аудитов, результаты которого позволят разработать наиболее рациональные решения по повышению ее эффективности.

Системы охлаждения валков различных широкополосных станов горячей прокатки (ШСП) существенно различаются между собой. Эти отличия состоят в расходе, давлении и температуре охладителя, конструкциях форсунок и коллекторов, схемах подачи охладителя на валки и др. Кроме того, каждый прокатный стан имеет определенные конструктивные (диаметры и материал валков, системы регулирования профиля и формы полос) и технологические особенности (температурно-скоростные, деформационные режимы прокатки, сортамент полос). Все это приводит к необходимости индивидуального подхода к оптимизации параметров системы охлаждения валков на каждом прокатном стане. При решении данной задачи одним из условий должно заключаться в минимизации расходов на проведение реконструкции (модернизации).

Наиболее рациональной схемой решения задачи является следующая.

- Проведение научно-технического аудита системы охлаждения валков.
- На базе полученных материалов определить наиболее рациональные варианты повышения ее эффективности и определить достигаемые технические показатели.
- Определить затраты при различных вариантах и ожидаемую прибыль от их реализации.
- Выбрать наиболее рациональный вариант модернизации с учетом возможных схем дальнейшего развития.

Остановимся более подробно на первой задаче – проведении научно-технического аудита системы охлаждения рабочих валков чистовой группы клетей.

Проведении аудита должно включать следующие этапы:

1. Сбор информации о параметрах существующей системы подачи охладителя, в том числе: общий расход охладителя и расход по клетям, температура и давление в подводящей магистрали, качество охладителя.
2. Сбор информации о конфигурации системы охлаждения в каждой клетке: параметрах коллекторов, их расположении относительно валков; количество и тип форсунок, включая их напорно-расходные характеристики; давление в коллекторах.
3. Существующий и перспективный сортамент стана.
4. Сбор данных о параметрах прокатки полос, включая режимы деформаций, температурный, скоростной режим прокатки.
5. Определение фактической схемы подачи охладителя на валки, состояния форсунок.
6. Экспериментальные исследования температурного режима эксплуатации валков в зависимости от технологических параметров прокатки полос, цикла прокатки, фактических параметров системы охлаждения валков.

Как показывает опыт проведения подобных исследований, значительную трудность представляет задача определения фактической схемы подачи охладителя на поверхность валков и ориентации форсунок. С целью решения данной задачи целесообразно использовать специальную методику. Вначале производят измерения расположения коллекторов в их рабочем положении по отношению к валкам. Затем проводят экспериментальное исследование по определению фактической схемы подачи охладителя на поверхность валков. Эксперимент состоит в следующем. Валки оборачивают ламинированной бумагой с цветным полимерным слоем. Затем валки заваливают в клеть, обеспечивают уровень прокатки, подводят перемещаемые коллектора охлаждения рабочих валков и включают систему охлаждения на определенное время, которое зависит от давления охлаждающей жидкости (силы удара струи) и прочности ламинированной бумаги. После этого валки вываливают. Струи воды при попадании на валок разрушают верхний (бумажный) слой, а внутренний ламинированный становится видимым. После вывалки валков их поверхность фотографируют и производят замеры зон охлаждения. По следам работы форсунок на развернутой бумаге определяют площадь орошения и ее распределение по длине бочки валков. Следы факелов воды достаточно хорошо отражают ориентацию форсунок в коллекторах. В качестве примера на рис.1 показан участок коллектора охлаждения нижнего рабочего валка ШСГП 2000 ОАО «ММК» и соответствующие следы работы форсунок на поверхности валка.



Рис.1. Следы факела форсунок на нижнем валке со стороны выхода и зеркальное отображение расположения форсунок на коллекторе

На рис.2 показаны следы работы форсунок на верхнем рабочем валке со стороны входа. Вследствие того, что подача охладителя на верхние валки производится с большого расстояния, факелы смежных форсунок пересекаются и охлаждение происходит неорганизованными струями.



Рис.2. Следы факела форсунок на верхнем валке со стороны входа

На основании выполненных замеров составляют схему охлаждения валков и рассчитывают центральные углы зон охлаждения валков, а также рассчитывают реальные углы раскрытия факелов форсунок. В частности, в таблице 1. показаны рассчитанные углы зон охлаждения для верхнего и нижнего валков чистовой группы ШСГП 2000 ОАО «ММК».

Таблица 1 - Центральные углы зон охлаждения валков

Углы охлаждения, начиная от выхода из очага деформации	Значения углов, град.	
	Верхний валок	Нижний валок
Угол до начала зоны активного охлаждения со стороны выхода	50	65
Угол зоны активного охлаждения со стороны выхода	95	60
Угол от конца зоны активного охлаждения до вертикальной оси валка	35	55
Угол от вертикальной оси валка до начала зоны активного охлаждения со стороны входа	30	55
Угол зоны активного охлаждения со стороны входа	80	60
Угол от конца зоны активного охлаждения до вертикальной оси валка	70	65

Важнейшими факторами эффективности работы системы охлаждения валков являются давление воды в коллекторах и общий расход воды. Поэтому необходимо экспериментально или, по крайней мере, расчетным методом определить эти величины. Для этого необходимо иметь информацию о напорно-расходных характеристиках применяемых форсунок, которые можно получить в лабораторных условиях на специальном стенде. Если известен расход воды и давление в коллекторах, но неизвестны напорно-расходные характеристики форсунок, то, зная общее количество форсунок, их можно рассчитать по выражению:

$$p = p_0 \cdot \left( \frac{Q}{Q_0} \right)^2 \quad (1)$$

где  $p$  и  $Q$  – соответственно давление и расход воды;  $p_0$  и  $Q_0$  – известные (опорные) значения давления и расхода воды.

В условиях ШСГП 2000 ОАО «ММК» не измеряется расход воды на каждую клеть. Поэтому напорно-расходную характеристику форсунок определяли в лабораторных условиях фирмы Lechler. Проведенные исследования показали, что средний угол раскрытия факела струи составляет  $75^\circ$ . Распыл отличается нестабильной формой факела струи. Колебания наблюдаются даже при поддержании постоянного давления. Реально полученные значения расхода воды - 216 л/мин. ( $12,96 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) при давлении 6 атм намного выше номинальных значений - 133 л/мин ( $8 \text{ м}^3/\text{ч}$ ).

Результаты экспериментального определения распределения жидкости по факелу форсунок приведены на рис.3.

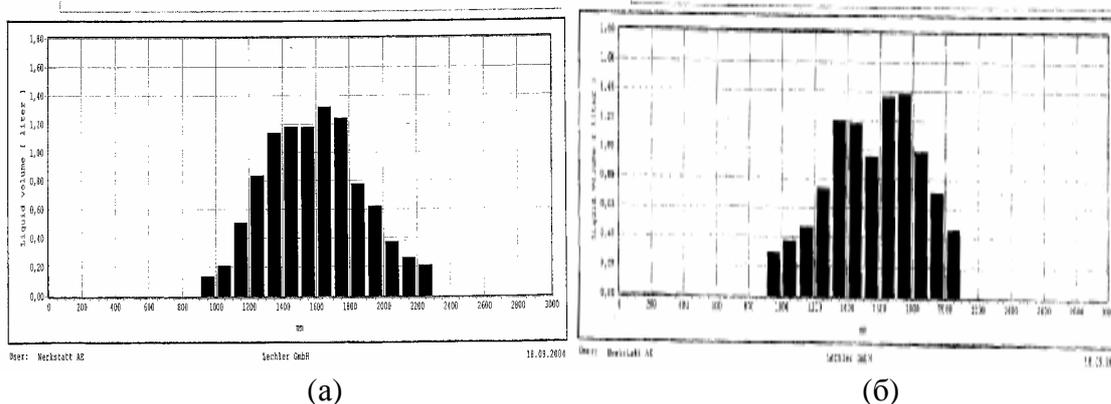


Рис. 3. Результаты экспериментального определения распределения жидкости при работе форсунок, используемых для охлаждения рабочих валков ШСГП 2000 (спрейер  $8 \times 19,5 \text{ мм}$ ). Расстояние до форсунки 860 мм (а) и 740 мм (б).

Исследования, выполненные на ШСГП 2000 ОАО «ММК» по описанной методике позволили выявить следующие основные особенности существующей системы охлаждения валков чистой группы клетей.

Системы охлаждения валков во всех клетях чистой группы однотипны. Расход воды по клетям, а также на входной и выходной сторонах клетей практически нерегулируем, что приводит к нерациональному использованию охладителя в зависимости от температурных и деформационно-силовых режимов прокатки полос различного сортамента. Отсутствуют приборы измерения расходов и давления воды в каждой клетке.

Схемы подачи охлаждающей воды на верхние и нижние рабочие валки принципиально различны. Проведенные измерения и расчеты показали, что расстояние от форсунок до поверхности верхнего рабочего валка составляет примерно 740 мм со стороны входа и 860 мм со стороны выхода (при диаметре валков 800 мм). Для нижнего рабочего валка эти расстояния составляют соответственно 155 и 140 мм. Верхние коллектора установлены стационарно. Нижние - отводятся при перевалках валков.

Большое расстояние от коллекторов до верхних валков существенно снижает эффективность охлаждения и затрудняет ориентацию форсунок по отношению к валкам. Часть воды не попадает на валки и захватывает с входной стороны отсекатель, а с выходной – верхний опорный валок.

Подача охладителя равномерна на центральном участке валков. Длина этого участка составляет примерно 800 мм для верхнего и 1200 мм для нижнего валка. За пределами этой зоны длиной 800 мм к краям бочки верхнего валка расход воды снижается, создавая неравномерность температурного поля по длине валков в местах прокатки прикромочных участков более широких полос. На нижних валках за пределами центральной зоны 1200 мм расход охладителя резко снижается, что создает предпосылки для перегрева валков при прокатке полос шириной 1300 мм и более.

Моделирование существующей схемы подачи охладителя на верхние валки из двухрядных коллекторов показало, что факелы смежных форсунок пересекаются до попадания охладителя на валки, что существенно снижает эффективность охлаждения. Слой стекающей воды с верхнего опорного валка также снижает эффективность охлаждения в верхней части зоны орошения.

Подача воды на нижние рабочие валки из двухрядных коллекторов также приводит к перекрытию факелов вследствие неудачного выбора соотношения шага форсунок в коллекторе, величины смещения форсунок в смежных рядах и углов наклона форсунок к оси коллектора.

Имеет место засорение форсунок, несмотря на предварительную фильтрацию воды перед насосной станцией.

Уровень давления воды в трубопроводе охлаждения перед чистой группой клетей составляет 6,5-7 атм., однако измеренное давление в коллекторе охлаждения валков составило 3,5 атм., что недостаточно для эффективного охлаждения. Такой перепад вызван нерациональным выбором проходных сечений форсунок.

Экспериментальное исследование температурного режима эксплуатации валков показывает эффективность работы системы охлаждения в каждой клетке с учетом технологических параметров прокатки. С этой целью проводят измерения температуры валков сразу после их вывалки из клетей. При этом из АСУТП получают информацию о технологических параметрах прокатки последних перед перевалкой полос. Температуру валков необходимо измерять как на центральном участке валков, где она, как правило, максимальна, так и по длине бочки валков с интервалом не более 50-100 мм, что позволяет оценить стабильность охлаждения по длине валков.

Анализ результатов, полученных на ШСГП 2000 ОАО «ММК», показал следующее.

Температура рабочих валков в центральной части изменяется от 49 до 87 °С при прокатке полос исследованного сортамента. Наибольшая температура валков наблюдалась в клетях № 7 и 8. Затем (в порядке убывания): клетки № 9 и 11, № 10, 12, 13 (Рис.4).

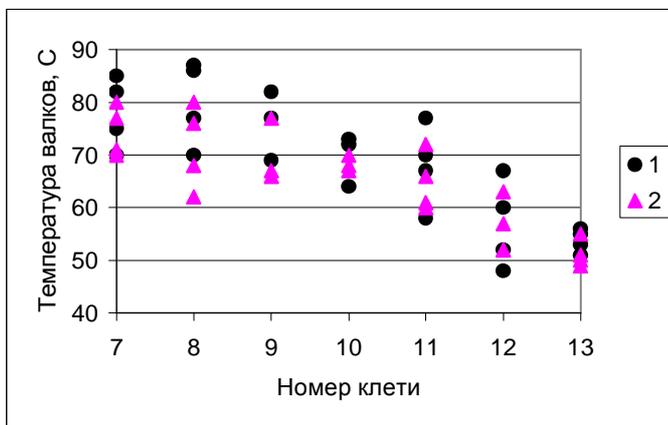


Рис.4. Диапазоны изменения температуры валков по клетям:  
1 – верхние валки, 2 – нижние.

За счет лучшей схемы охлаждения нижних валков их температура, как правило, меньше, чем верхних, причем эта разница увеличивается с повышением температуры валков, которая, в свою очередь, зависит от энергосиловых параметров прокатки (рис.5).

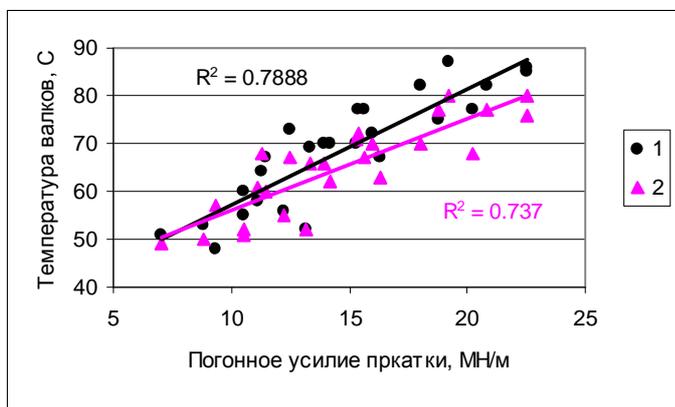


Рис.5. Зависимость температуры валков от погонного усилия прокатки (на метр ширины полосы): 1 – верхние валки, 2 – нижние.

На температуру валков оказывают влияние следующие основные технологические параметры: длина дуги контакта вала с полосой, среднее удельное давление, температура полосы, скорость вращения вала, температура охладителя. Влияние технологических параметров прокатки в наибольшей степени объединяет такой показатель, как погонное усилие прокатки.

Эффективность работы системы охлаждения валков в каждой клетке приблизительно можно оценить коэффициентом эффективности:

$$K_э = P \cdot \frac{1000}{Q} \cdot \frac{T_{\text{маш}} / T_{\text{ц}}}{T_{\text{с}} - T_{\text{охл}}} \quad (2)$$

где  $P$  - погонное усилие прокатки, МН/м;  $T_{\text{маш}}$  - машинное время прокатки, с;  $T_{\text{ц}}$  - время цикла прокатки, с;  $Q$  - расход воды на охлаждение валков в данной клетке, м<sup>3</sup>/ч;  $T_{\text{с}}$  - температура центрального участка вала, °С;  $T_{\text{охл}}$  - температура охлаждающей воды, °С.

В условиях, когда неизвестен расход воды на каждую клетку и доля машинного времени во времени цикла меняется незначительно, с некоторыми допущениями эффективность работы системы охлаждения рабочих валков можно оценивать коэффициентом, определяемым по следующему выражению:

$$K_э = \frac{P}{T_{\text{с}} - T_{\text{охл}}} \quad (3)$$

Рассчитанные значения этого коэффициента (3) для рассматриваемого прокатного стана приведены на рис. 6. Эти данные показывают, что наименее эффективно системы охлаждения валков работают в клетях № 9-11, наиболее эффективно - в клетях № 12.

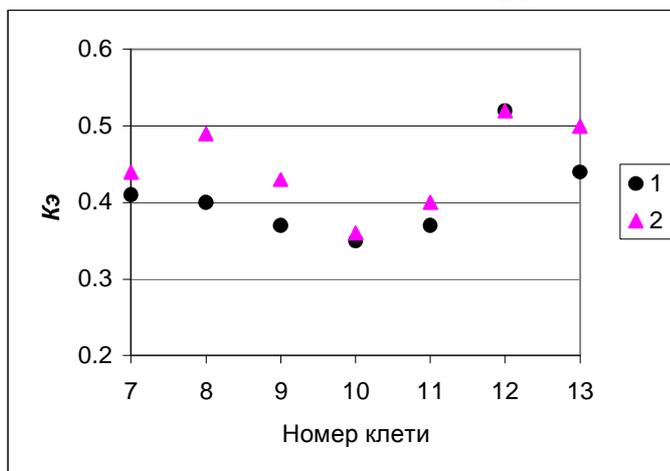


Рис.6. Средние значения показателя  $K_3$  по клетям чистовой группы:  
1 – верхние валки, 2 – нижние.

В целом замеры температуры показали, что температурный режим валков является нестабильным. Очевидно, это вызвано недостаточно точной ориентацией коллекторов и форсунок в различных клетях вследствие особенностей их конструкции и расположения. Температура валков отличается нестабильностью и по их длине. Так, разница температуры в двух точках, расположенных на расстоянии 50 мм на поверхности по длине бочки валка может достигать 7°C.

Результаты проведенных исследований по изложенной методике использовали для разработки рекомендаций по повышению эффективности работы системы охлаждения валков. Наиболее рациональные решения могут быть определены с использованием математических моделей температурного режима эксплуатации валков. В частности, такая модель и комплекс прикладных программ разработаны и применяются в Институте черной металлургии<sup>\*)</sup>.

Одна из программ (TRollCS ©) позволяет рассчитывать изменение среднemasовой температуры валка в его центральном сечении во время прокатки полосы, во время паузы между прокатываемыми полосами, а также поле температур в центральном поперечном сечении валка (по радиусу валка и его окружности).

В качестве исходных данных используются следующие основные параметры.

1. Параметры прокатки: толщина полосы на входе и выходе из клетки, скорость прокатки, температура полосы на входе в клетку, машинное время и время пауз, погонное усилие прокатки, наличие технологической смазки.

2. Параметры валков: диаметр, начальная температура, коэффициенты температуропроводности и теплопроводности, положение в клетке (верхний или нижний валок).

3. Параметры системы охлаждения: температура и давление воды, расстояние от форсунок до поверхности валка, погонный расход воды на входной и выходной стороне валка, схема подачи охладителя по окружности валка, наличие подстуживания полосы на входе в валки и подачи технологической смазки.

<sup>\*)</sup> Воробей С.А., Приходько И.Ю. Моделирование температурного режима рабочих валков широкополосного стана горячей прокатки // В кн. «Научные новости. Современные проблемы металлургии. Пластическая деформация металлов», том 8, г. Днепрпетровск, 2005.- С. 232-235

Программа работает в двух режимах: расчет температуры валка после прокатки одной полосы; расчет установившегося температурного режима валков, который определяется расчетной разницей средней температуры валка после прокатки смежных полос не более  $\pm 0,5$  °С.

Данная программа вошла составной частью в более общую программу расчета и оптимизации температурного режима рабочих валков клетей чистовой группы (TRollHSM ©). Эта программа позволяет рассчитывать режимы прокатки (энергосиловые параметры, температуру полосы по клетям) и определять оптимальное распределение охладителя по клетям с учетом режима прокатки, выбранной конфигурации системы охлаждения в каждой клетке и заданной температуры валков. В эту программу дополнительно вводятся следующие параметры: общее количество рабочих клетей; толщина, длина и температура раската; конечная толщина полос; химический состав стали; погонный расход воды на межклетьеовое охлаждение полосы. Режим обжатию по клетям стана рассчитывается, но может быть и задан. Расчетные усилия прокатки могут быть скорректированы с учетом данных измерений.

Расчеты температуры валков могут выполняться в двух вариантах: после прокатки заданного количества полос, либо с выходом до стационарного температурного режима. Во втором случае можно оптимизировать расход воды по клетям стана, задав требуемые температуры валков. При расчете расхода воды в каждой клетке программа учитывает заданные напорно-расходные характеристики форсунок.

С использованием данных программ выполнены расчеты для чистовой группы клетей ШСГП 2000.

Для верхних валков клетки № 7 рассмотрены следующие варианты:

- приближение форсунок к поверхности валков на 150 мм от существующего положения, что возможно без реконструкции оборудования клетей) с одновременным обеспечением подачи всей охлаждающей воды на поверхность валка;
- оптимизация расположения и конструкции форсунок с устранением пересечения смежных факелов;
- применение технологической смазки;
- применение подстуживания поверхности полосы на входе в клетку;
- повышение давления воды в коллекторе;
- расположение форсунок на расстоянии 200 мм;
- приближение начала зоны активного охлаждения к выходу из очага деформации;
- оптимизация углов зон активного охлаждения;
- изменение погонного расхода воды;
- снижение температуры воды.

Для нижних валков клетки № 7 рассмотрены следующие варианты:

- оптимизация расположения и конструкции форсунок с устранением пересечения смежных факелов;
- применение технологической смазки;
- применение подстуживания поверхности полосы на входе в клетку;
- повышение давления воды в коллекторе;
- приближение начала зоны активного охлаждения к выходу из очага деформации;
- оптимизация углов зон активного охлаждения;
- изменение погонного расхода воды;
- снижение температуры воды.

Для верхних валков клетки № 13 рассмотрены следующие варианты:

- приближение форсунок к поверхности валков на 150 мм от существующего положения, что возможно без реконструкции оборудования клетей) с одновременным обеспечением подачи всей охлаждающей воды на поверхность валка;
- оптимизация расположения и конструкции форсунок с устранением пересечения смежных факелов;

- повышение давления воды в коллекторе;
- расположение форсунок на расстоянии 200 мм;
- приближение начала зоны активного охлаждения к выходу из очага деформации;
- оптимизация углов зон активного охлаждения;
- изменение погонного расхода воды;
- снижение температуры воды.

Для нижних валков клетки № 13 рассмотрены следующие варианты:

- оптимизация расположения и конструкции форсунок с устранением пересечения смежных факелов;
- повышение давления воды в коллекторе до 6 атм.;
- приближение начала зоны активного охлаждения к выходу из очага деформации;
- изменение погонного расхода воды;
- снижение температуры воды.

Моделирование показало следующие результаты.

#### Валки первых клетей чистовой группы.

Наиболее эффективными решениями являются оснащение системами технологической смазки либо подстуживания поверхности полосы перед входом в очаг деформации. Значительного увеличения эффективности охлаждения можно добиться за счет увеличения углов зон охлаждения, особенно со стороны выхода. Эффективность охлаждения увеличивается при приближении начала зоны активного охлаждения к выходу из очага деформации.

Увеличение расхода воды сверх существующего уровня незначительно повышает эффективность охлаждения.

#### Валки последних клетей чистовой группы.

Снижения температуры валков можно достигнуть за счет оптимизации схем размещения и конструкций форсунок. Приближение начала зоны активного охлаждения к выходу из очага деформации не повышает эффективности охлаждения валков. Увеличение углов зон охлаждения мало влияет на эффективность охлаждения.

Эффективность охлаждения валков во всех клетях значительно повышается при увеличении давления в коллекторах и снижении температуры воды.

Повышение эффективности охлаждения в последних клетях позволит уменьшить расход воды, направив ее избыток на подстуживание поверхности полосы и на организацию управления расходом воды по клетям стана при прокатке полос различного сортамента.

При выборе варианта модернизации системы охлаждения валков необходимо учитывать следующее.

Оптимизация схемы охлаждения валков, а также повышение давления воды в коллекторах потребует установки форсунок с меньшим сечением сопла. Для обеспечения эффективной их работы целесообразно повышение степени очистки воды.

Принципиальное изменение схемы охлаждения – приближение форсунок к поверхности верхних валков до 200 мм, увеличение зон активного охлаждения, приближение охлаждения к выходу из очага деформации и пр. потребует коренную реконструкцию межклетьевого оборудования.

Любой эффективный вариант модернизации системы охлаждения валков потребует корректировки сложившейся системы профилировок валков.

На основании выполненного аудита системы охлаждения рабочих валков чистовой группы клетей ШСГП 2000 ОАО «ММК» предложены рациональные варианты поэтапного повышения её эффективности.