

НАГРУЖЕННОСТЬ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ С УЧЕТОМ ФАКТОРА ВРЕМЕНИ

В.П.Анисифоров, Л.В.Коновалов,
А.В.Минкин

Эффективность методов защиты оборудования от нагрузок, как и результатов расчета на долговечность, во многом определяется тем, насколько достоверно выявлены и систематизированы величины и частота появления фактических нагрузок различного уровня и, в первую очередь, максимальных.

Режимы нагружения машин циклического действия, в основном, представляют собой регулярные процессы, для которых методы систематизации нагрузок за длительное время работы также должны учитывать случайные изменения внешних факторов, обычно вызывающих значительный разброс величин действующих нагрузок.

Применительно к машинам циклического действия и, в частности, прокатным станам, фактические нагрузки систематизируют для получения годовых расчетных графиков нагружения. С этой целью закономерности, свойственные итоговому эмпирическому распределению нагрузок технологических машин одного типа, сопоставляют с различными статистическими законами распределения.

Изменения же сортамента (продукции) выпускаемого оборудования, на котором исследовались условия нагружения, приводит при прочих неизменных условиях к другому виду суммарного расчетного графика и, следовательно, к другим статистическим законам распределения нагрузок. Последнее обстоятельство существенно снижает не только общность результатов, получаемых на основе итогового эмпирического графика нагружения для фиксированного сортамента, но и их практическую применимость, особенно при расчетном обосновании вновь проектируемых машин.

В связи с этим возникает необходимость разработки таких методов систематизации нагрузок, с помощью которых построение близких к реальным графиков нагружения машин циклического действия и последующее определение эквивалентных нагрузок выполнялось бы для любых наперед заданных условий уже на стадии проектирования машин, а также в период эксплуатации при изменении сортамента или программы загрузки оборудования.

Этой цели отвечает предлагаемая ниже методика построения годового графика нагружения механизмов прокатного стана, основанная на применении статистических методов при оценке рассеяния нагрузок относительно средних на любом заданном сорте, при регулярных процессах нагружения.

Рассмотрим основные положения методики в общем случае, когда годовой сортамент прокатного стана может **содержать t типоразмеров проката (трубы, сорт и проч.)**. В первом приближении на любом i -ом типоразмере при регулярных нагрузках **нагруженность стана характеризуется средней величиной обобщенной нагрузки**
 $Q_{ср} / M_{ср} ; P_{ср} /$.

Под средней за цикл величиной следует понимать нагрузку, соответствующую наиболее вероятным значениям таких параметров прокатки, как обжатие, вытяжка, подача, температура прокатки, размеры проката и пр. Очевидно, что в качестве наиболее вероятных могут рассматриваться значения этих параметров, приведенные в технологических инструкциях прокатки на данном стане. Таким образом, при расчете средних нагрузок необходимо знать функциональную связь нагрузки и указанных параметров прокатки, для чего в зависимости от вида оборудования могут быть использованы рекомендации [I] по определению номинальных технологических нагрузок.

По годовой программе прокатного стана можно найти, по существу, и относительную продолжительность **действия нагрузки $Q_{ср_i}$** .

Включение в программу или исключение из нее того или иного вида проката может привести также к различным

вариациям средних значений нагрузок, что легко поддается учету как при подсчете самих средних нагрузок, так и соответствующего им числа циклов нагружения Z_i .

Однако действительный спектр нагрузок будет отличаться от полученного указанным способом, главным образом тем, что на любом i -ом типоразмере имеет место рассеяние реальных нагрузок около $Q_{ср_i}$ ^x). В этих условиях расчет оборудования на долговечность без учета разброса нагрузок может привести к существенным ошибкам, особенно для законов распределения с правосторонней асимметрией. Долговечность оборудования может быть обоснованно найдена лишь по величине эквивалентной нагрузки $Q_{эkv}$ (2), (3), учитывающей как значение самой средней, так и разброс около нее.

*) Учет наложения динамических добавок, которое также имеет привести к значительным отклонениям в величине расчетной нагрузки, является самостоятельной задачей и здесь не рассматривается. Отметим лишь, что при регулярных процессах нагружения представляется возможным систематизировать динамические нагрузки независимо от основных технологических.

Рассмотрим определение $Q_{\text{экв}}$ при известном годовом сортаменте, включающем t типоразмеров проката. Эквивалентная расчетная нагрузка может быть вычислена по формуле

$$Q_{\text{экв}} = Q_{\text{max}} \sqrt[m]{\sum_t \left(\frac{Q_i}{Q_{\text{max}}}\right)^m \cdot \frac{z_i}{z_0}}, \quad (1)$$

где Q_{max} - максимальная за одну подачу нагрузка на самом "тяжелом" типоразмере.

В формуле (1) выражение $\sqrt[m]{\sum_t \left(\frac{Q_i}{Q_{\text{max}}}\right)^m \cdot \frac{z_i}{z_0}}$ следует рассматривать в качестве коэффициента долговечности K_q , вводимого при определении эквивалентной нагрузки по (3), причем $K_q = K_q \cdot K_T$, т.е. произведению коэффициентов переменности нагружения и срока службы, соответственно. В рассматриваемом случае

$$K_q = \sqrt[m]{\sum_t \left(\frac{Q_i}{Q_{\text{max}}}\right)^m \cdot \frac{z_i}{z_t}} \quad \text{и} \quad K_T = \sqrt[m]{\frac{z_t}{z_0}};$$

$z_t = z_{\text{рас}}$ - суммарное (расчетное) число циклов на всем сортаменте (из t типоразмеров).

Для того, чтобы перейти к количественному определению $Q_{\text{экв}}$, необходимо найти закон распределения полученных экспериментальных значений нагрузки Q_i при прокатке каждого из типоразмеров проката. Знание этого закона позволяет определить ожидаемую частоту

появления нагрузки любого заданного уровня, величину максимальной ожидаемой нагрузки и, следовательно, построить график нагружения оборудования стана и предусмотреть средства его защиты от перегрузок.

В связи с тем, что изменения величины подачи или обжатий, температуры и других параметров, вызывающих разброс нагрузок в процессе прокатки данного типоразмера, носят случайный характер, можно ожидать, что при увеличении количества измерений фактическое распределение нагрузок будет приближаться к нормальному.

В этом случае при прокатке i -го типоразмера плотность вероятности f_i появления любой заданной за цикл нагрузки Q_i будет определяться выражением

$$f_i = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-0,5 \cdot \frac{\Delta Q_{срi}^2}{\sigma_i^2}}, \quad (2)$$

где $\Delta Q_{срi} = Q_i - Q_{срi}$ - разность между заданной нагрузкой (моментом, давлением) Q и средней для данного типоразмера величиной нагрузки $Q_{срi}$;

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum \Delta Q_{срi}^2}{N_i}} - \text{среднее квадратичное отклонение;}$$

N_i - общее количество нагружений (циклов прокатки или подач) в

год при прокатке данного
 i - го типоразмера.

Проверка близости экспериментального распределения нагрузки для различных типоразмеров нормальному может быть выполнена с помощью критерия Пирсона χ^2 :

$$\chi^2 = \sum \frac{(y_0 - y_n)^2}{y_n},$$

где y_0, y_n - экспериментальная (фактическая) и ожидаемая вычисленная частоты появления нагрузки Q_i .

Величина средней нагрузки и среднего квадратичного отклонения могут быть подсчитаны отдельно для каждого типоразмера. Поскольку величина средней нагрузки зависит от типоразмера проката, в качестве сравнительной характеристики разброса нагрузок для различных типоразмеров необходимо пользоваться безразмерным коэффициентом вариации v_i , представляющим собой отношение среднего квадратичного отклонения σ_i к средней нагрузке $Q_{срi}$:

$$v_i = \frac{\sigma_i}{Q_{срi}}.$$

Известны многочисленные примеры того, что коэффициент вариации является наиболее стабильной из безразмерных характеристик статистического распределения нагрузок для машин одного типа. Можно ожидать, что

характер разброса значений нагрузки относительно средней величины ее практически не зависит от типоразмера проката и величина коэффициента ν_i , изменяется лишь в незначительных пределах.

Отсюда следует, что при характере разброса нагрузок, близком к нормальному закону распределения, для анализа режима нагружения стана за длительный период времени наиболее обоснованной является величина коэффициента вариации ν_i , близкая к его наибольшему экспериментальному значению. Если же учесть, что коэффициент вариации не зависит от типоразмера проката, его наибольшее значение можно с небольшой ошибкой принять одинаковым для всего сортамента стана.

На основе проведенных выше допущений о характере распределения нагрузок для любого i -го типоразмера можно предложить сравнительно простую методику построения суммарного графика нагружения и определения K_Q .

Предварительно рассмотрим выражение (2), подставив в него значение $\sigma_i = \nu_i \cdot Q_{срi}$; тогда

$$f_i = \frac{1}{\nu_i \cdot Q_{срi} \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-0,5 \frac{\Delta Q_{срi}^2}{\nu_i^2 \cdot Q_{срi}^2}} \quad (2a)$$

Из уравнения (2а) видно, что при справедливости допущения $\gamma_i = \text{Const}$ частота появления заданных нагрузок для i -го типоразмера зависит лишь от величины средней нагрузки $Q_{\text{ср}i}$. Это позволяет типоразмеры труб, имеющие одинаковые или близкие значения средних нагрузок (крутящих моментов и давлений) объединить в одну группу с тем, чтобы для группы с общей средней нагрузкой вести подсчет частот появления нагрузки заданного уровня, относя полученные результаты для всех входящих в группу типоразмеров.

Подсчет для любой группы нагрузки выполняется внутри каждого из j интервалов, на которые разбивается весь диапазон нагрузок от наименьшей до наибольшей, когда величину последней можно принять, например, из условий статической прочности.

Тогда выражения (2) следует использовать для определения частоты появления нагрузки $Q_i = Q_j$, находящейся внутри рассматриваемого интервала, относя полученные результаты к той группе, для которой подставлялось значение $Q_{\text{ср}i} = Q_{\text{ср}q}$. При этом построение годового графика нагружения значительно упрощается, а подсчет частоты нагружения внутри любой группы q для каждого интервала выполняется по формуле:

$$f_{jq} = \frac{\omega}{v_i \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \frac{N_q}{Q_{срq}} \cdot e^{-\frac{0.5}{v_i^2} \cdot \left(\frac{Q_j}{Q_{срq}} - 1\right)^2}, \quad (26)$$

где j - текущий номер интервала; q - текущий номер группы; ω - шаг между соседними интервалами нагрузок.

Значение $N_q = \sum_{i=1}^i N_i$, т.е. равно сумме N_i для всех i типоразмеров, образующих группу q .

Найдя предварительно внутри каждого интервала нагрузок с фиксированной нагрузкой Q_j суммарное для всех групп число циклов нагружения Z_j , можно определить величину коэффициента переменности нагружения, как

$$K'_q = \sqrt[m]{\sum_n \left(\frac{Q_j}{Q_{\max}}\right)^m \cdot \frac{Z_j}{Z_n}}, \quad (3)$$

где Z_n - суммарное число циклов нагружения для всего сортамента (на n интервалах), т.е.

$$Z_n = Z_t, \quad \text{причем} \quad Z_j = f(N_j).$$

Значения K'_q относятся ко всему сортаменту и равны величинам K_q , найденным по формуле (1а), также соответствующим всему годовому сортаменту.

Тогда выражение (1) для определения эквивалентной расчетной нагрузки по всему годовому сортаменту может

быть записано в виде

$$Q_{\text{экв}} = Q_{\text{max}} \cdot \sqrt[n]{\sum_{j=1}^n \left(\frac{Q_j}{Q_{\text{max}}}\right)^m} \cdot \frac{\lambda_i}{\lambda_n} \quad (4)$$

Рассмотрим предлагаемый метод статистической обработки экспериментальных данных о нагруженности машин циклического действия на примере построения расчетного графика нагружения главной линии пилигримового стана, работающего в характерном циклически повторяющемся режиме.

Приводимый ниже анализ нагрузок при пильгеровании основан на результатах экспериментальных исследований пилигримового стана Челябинского трубопрокатного завода, выполненных ВНИИМЕТМАШ.

Цель этих исследований заключалась в оценке работоспособности существующего оборудования стана с учетом его загрузки в течение года, исходя из фактического сортамента и производительности. Большое внимание в исследованиях было уделено накоплению данных о фактических нагрузках и, в первую очередь, о крутящих моментах, т.к. воздействию крутящего момента подвергается большая часть деталей линии привода. Замер крутящих моментов $M_{кр}$ осуществляется методом тензометрирования с применением проволочных датчиков сопротивления. Датчики наклеивались на шпинделях, соединяющих рабочие валки с шестеренной клетью. Давления

Р металла на валки измерялись одновременно с крутящими моментами с помощью месдсз, устанавливаемых под нажимные винты рабочей клетки. Измерение нагрузок выполнено при прокатке более 20 различных типоразмеров труб, представлявших свыше 80 % от годового сортамента по тоннажу. Всего за период исследований получено свыше 15000 значений величин крутящих моментов и давлений на валки, что является вполне представительным для рассматриваемого типа оборудования при проверке предлагаемого метода систематизации нагрузок и нахождения $Q_{экв}$.

Из полученных при исследованиях осциллограмм нагрузок (рис.1) видно, что величина крутящего момента и давления на валки за время одной подачи (один цикл нагружения) сначала увеличивается, достигая максимума при некотором угле поворота валков, и затем, вплоть до выхода металла из калибра, постепенно уменьшается. Подобное изменение нагрузки в течение одной подачи сохранялось для всех исследованных типоразмеров труб, и является, таким образом, регулярным процессом. При прокатке, как показали замеры, наблюдается большой разброс значений максимальной (см. рис.1) за цикл нагрузки (крутящего момента и давления на валки). В пределах одного типоразмера величина крутящего момента

Осциллограмма крутящего момента и давления на валу

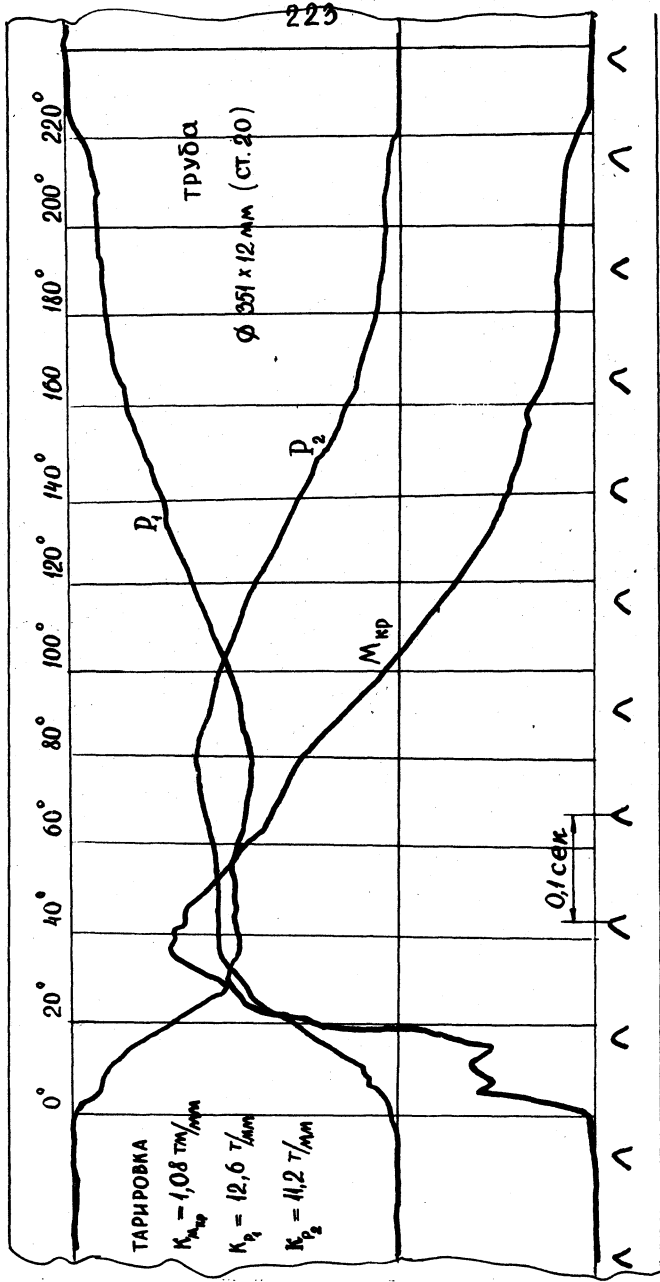


Рис. 1

изменяется от 10-20 до 100-120 тм, а давление на валки от 100-200 до 1000-1300 т. Все значения крутящих моментов и давлений на валки, полученные при экспериментальном исследовании, были разбиты по интервалам с шагом 10 тм для $M_{кр}$ и 100 т для P соответственно. Число циклов прокатки находилось с учетом удельного веса соответствующего i -го типоразмера в годовом сортаменте и принятой технологии прокатки (величина подачи, размер и вес слитков, величина потерь металла и т.д.) по формуле
$$N_i = \frac{L_i}{M \cdot S_i},$$

где L_i - общая длина прокатанных за год труб i -го типоразмера;

S_i - величина подачи на гильзе;

$M = \frac{F_r}{F_{тр}}$ - коэффициент вытяжки при пильгеровании;

$F_r, F_{тр}$ - площадь сечения гильзы и трубы соответственно.

В связи с тем, что по данным экспериментального исследования был выявлен фактический разброс нагрузки, количество циклов нагружения определялось также отдельно для каждого зафиксированного уровня нагрузки внутри всего диапазона разброса M и P для рассматриваемого типоразмера. При совпадении или близости уровней нагружения, когда расхождение между двумя или

несколькими значениями нагрузки не превышало половины выбранного интервала группирования, возможно суммирование соответствующего этим уровням числа циклов нагружения.

Одновременно определялись для каждого типоразмера значения: $M_{ср_i}$ и $P_{ср_i}$, среднего квадратичного отклонения коэффициента вариации V_i (см. табл. 1 и 2).

Поскольку имеющиеся теоретические рекомендации для подсчета $Q_{ср_i}$ при пильгерованиях неточны, в наших исследованиях на ряде типоразмеров труб (351 x 9 : 11 мм, 351 x 22 мм, 351 x 30 мм, 377 x 7,10 мм, 426 x 9 мм, 465 x 21,5 мм, 351 x 22 мм и др.) изучалось влияние подачи, температуры и др. параметров на величину крутящих моментов и давлений, для чего по перемещению штоков гидроцилиндров измерялась подача, а по показаниям пирометра - температура проката.

Проведенное исследование нагруженности стана дает

возможность проверить полученные значения эквивалентного момента по предлагаемому методу систематизации нагрузок.

Разобьем все полученные значения $M_{ср}$ на ограниченное

число групп. Применительно к сортаменту пхлигримового стана ЧТПВ, у которого минимальные и максимальные средние значения технологического крутящего момента соответственно равны 35 и 75 тм , в

группу $M_{ср}$ включались типоразмеры со значениями средних крутящих моментов, отличающихся на величину $\pm 2,5$ тм. Это позволило весь сортамент стана представить только 9 группами труб, каждая из которых имеет свое значение $M_{срq}$, $P_{срq}$ (таблица 3). Если весь диапазон разброса значений крутящих моментов, соответствующий по данным экспериментального исследования 110 тм (от 10 тм до 120 тм), представить с помощью n интервалов при величине одного интервала 10 тм, то число интервалов $n = 12$ (табл. 3).

Прежде чем перейти к определению $Q_{экр}$, проверим отличие фактического распределения внутри одной группы от нормального.

Величина χ^2 и значения вероятности P_{χ^2} определялись для типоразмеров, при прокатке которых проведено наибольшее количество измерений нагрузки (трубы ϕ 325 x 10 мм, ϕ 377 x 10 мм, ϕ 465 x 11 мм). Как видно из табл. 4, вероятность P_{χ^2} того, что фактическое распределение будет отличаться от нормального на величину меньшую подсчитанного критерия, χ^2 для рассмотренных типоразмеров превышает величину допустимой вероятности, обычно принимаемой равной 0,01 (4). Причем значение вероятности P_{χ^2} возрастает при использовании правила по отбрасыванию измерений, величина

которых существенно отличается от всей совокупности значений.

В связи со справедливостью нормального закона, подтвержденной критерием согласия, можно перейти к расчету частоты появления нагрузки Q_i . Для этого преобразуем формулу (2) с учетом полученных выше результатов обработки экспериментальных данных. Как видно из табл. 1,2, подсчитанная величина коэффициента вариации V_i колеблется от 0,16 до 0,24 для крутящих моментов и от 0,138 до 0,157 для давлений на валки. Причем, для измерений, проводившихся только на одной партии труб, в одной смене (трубы ϕ 351x9, II, I2, 22 мм; 325 x 50 мм, ϕ 465 x 21,5 мм и др.) коэффициент вариации для крутящих моментов колеблется в пределах 0,16 - 0,18 ^{x)}. Если же измерения повторялись несколько раз в различные смены и даже различные месяцы (трубы ϕ 325 x 10 мм, ϕ 377 x 10 мм, ϕ 426 x 10 мм, II мм, ϕ 465 x 15, 16 мм, ϕ 465 x 22 мм) коэффициент вариации возрастает до 0,22 - 0,24. Это обстоятельство объясняется тем, что в различные периоды работы

x) Исключения представляют трубы ϕ 485 x 30 мм и ϕ 351 x II мм, коэффициенты вариации для которых равны 0,215 и 0,224, соответственно.

в зависимости от состояния оборудования цеха и особенностей работы обслуживающего персонала изменяются технологические параметры, такие как средняя подача, температуры нагрева и т.д., что приводит к колебаниям средней нагрузки.

Полученные экспериментальные значения нагрузок можно рассматривать как выборки из всей совокупности нагружений стана в течение года. Вероятность же того, что для i - го типоразмера найденные значения $Q_{срi}$, σ_i и ν_i соответствуют всей совокупности, будет расти при увеличении количества взятых выборок и их объема (4). Относя в соответствии со значением $Q_{срi}$ рассматриваемый i -ый типоразмер к группе с номером q (из условия $Q_{срi} = Q_{срq}$), принимая расчетный коэффициент вариации равным $\nu_{рас} = 0,24$ для всех групп и подставляя его значение в выражения (2), получим следующее уравнение для расчета частоты y_{mq} появления крутящего момента величиной $M_i = M_j$ в группе q :

$$y_{mq} = 16,7 \frac{Nq}{M_{срq}} \cdot e^{-8,7 \left(\frac{M_i}{M_{срq}} - 1 \right)^2} \quad (5)$$

Здесь шаг ω между соседними интервалами нагрузок, как и принято в табл. 1, составляет 10 тм. Результаты подсчета по формуле (5) см. в табл. 3.

Если учесть, что наиболее вероятное значение

коэффициента вариации для давлений находится в таком же соотношении к расчетному коэффициенту вариации, как это имело место для одноименных труб по результатам обработки замеров крутящих моментов (см. табл. 1 и 2), то величину расчетного коэффициента вариации для давлений следует принять равным $v'_{\text{рас}} = 0,2$. Тогда уравнение для расчета разброса величины давления на валки и подсчета частоты U_{Pq} появления давлений величиной $P_i = P_j$ будет иметь следующий вид (для группы q):

$$U_{Pq} = 200 \frac{Nq}{P_{\text{ср}q}} \cdot e^{-12,5 \left(\frac{P_i}{P_{\text{ср}q}} - 1 \right)^2}, \quad (6)$$

где шаг ω между соседними интервалами нагрузок составляет 100 т, как принято в табл. 2.

Пользуясь таблицами вероятностей (4) в зависимости от принятого диапазона нагрузок, из уравнений (5), (6) можно определить вероятную величину максимальных и минимальных нагрузок для каждого типоразмера трубы.

Для диапазона, включающего $\sim 99\%$ нагрузок, возникающих при прокатке одного типоразмера труб, что практически соответствует $\pm 3\sigma_i$, имеем:

$$\begin{aligned} M_{\text{max}i} &= 1,62 M_{\text{ср}i}; & M_{\text{min}i} &= 0,38 M_{\text{ср}i}; \\ P_{\text{max}i} &= 1,52 P_{\text{ср}i}; & P_{\text{min}i} &= 0,48 P_{\text{ср}i}. \end{aligned}$$

Эти значения получены следующим образом.

Если функцию $f_i = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-0,5 \frac{\Delta Q_{ср_i}^2}{\sigma_i^2}}$ выразить через меру точности $h = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2}} = \frac{0,707}{\sigma_i}$, то можно записать

$$f_i = \frac{1}{h\sqrt{\pi}} \cdot e^{-h^2 \Delta Q_{ср_i}^2} \quad (7)$$

Для закона распределения (7) значение вероятности $P_x = 0,9899$, по существу, охватывает диапазон, близкий к $\pm 3\sigma_i$ и соответствует также возможности возникновения практически любых уровней нагружения на стане, не вызывающих повреждений от однократной нагрузки, включая самый тяжелый сортамент. Граничные значения Q_i на диапазоне нагрузок, определяемом P_x , равны Q_{min} и Q_{max} . Находим для указанной величины P_x по таблице интеграла вероятности (6) (табл. II) значение $h_x = 1,82$, входящее в показатель степени при e в формуле (7), имея в виду, что $x = \Delta Q_{ср_i} = Q_i - Q_{ср_i}$.
Учитывая $\sigma = \gamma \cdot \bar{x}$, где $\bar{x} = Q_{ср_i}$, имеем

$$h = \frac{1}{\gamma \cdot Q_{ср_i} \sqrt{2}}, \text{ и тогда}$$

$$h \cdot \Delta Q_{ср_i} = \frac{1}{\gamma \cdot Q_{ср_i} \sqrt{2}} \cdot \Delta Q_{ср_i} = \frac{1}{\gamma \cdot Q_{ср_i} \sqrt{2}} \cdot (Q_i - Q_{ср_i}) = \frac{1}{\gamma \sqrt{2}} \left(\frac{Q_i}{Q_{ср_i}} - 1 \right)$$

$$\text{При } \gamma = 0,24$$

$$h \cdot \Delta Q_{ср_i} = 2,95 \left(\frac{Q_i}{Q_{ср_i}} - 1 \right)$$

Для $h \cdot \Delta Q_{ср_i} = 1,82$ имеем

$$1,82 = 2,95 \left(\frac{Q_i}{Q_{ср_i}} - 1 \right) \quad \text{и}$$

$$\frac{Q_i}{Q_{ср_i}} = 1 + \frac{1,82}{2,95} = 1 + 0,616 = 1,62,$$

Отсюда $Q_i = Q_{\max_i} = 1,62 Q_{ср_i}$, или $M_{\max_i} = 1,62 M_{ср_i}$

Для $Q_i = Q_{\min}$ соответственно получим

$$Q_{\min_i} = (1 - 0,616) Q_{ср_i} \cong 0,38 Q_{ср_i}$$

$$\text{и } M_{\min_i} = 0,38 M_{ср_i}.$$

Можно было ожидать, что систематизация сортамента стана по группам нагрузок (крутящих моментов) $M_{ср_q}$, имеющим интервал в 5 тм при диапазоне разброса M в 110 тм, не внесет существенной погрешности в результаты определения $M_{экв}$, что является одновременно проверкой правильности принятого метода построения суммарного графика нагружения. Действительно, при использовании формулы (4) значения $M_{экв}$, составляющие 59,5 тм для $m=3$ и 75 тм для $m=9$, отличаются не более, чем на 2% в запас прочности от значений, вычисленных на основании экспериментальных данных, соответствующих всему объему полученной при замерах информации о загруженности главной линии (по рис.2) и равных соответственно 58,7 тм и 73,5 тм.

Таким образом, использование рассмотренного

ГРАФИК УСПЛАНОВИВИШИХСЯ НАГРУЗОК
 ПИЛЬБЕРСТАНА ЦП ПЗ (M_{фр} по годовому сортаменту)

M _i / M _{max}	1,0	0,918	0,835	0,75	0,666	0,383	0,5	0,416	0,333	0,25	0,167	0,08
Z _i / Z _{max}	0,001	0,005	0,018	0,056	0,130	0,215	0,240	0,165	0,085	0,050	0,030	0,005
Z _i / Z _{расч}	0,0012	0,005	0,022	0,064	0,148	0,242	0,262	0,162	0,064	0,022	0,007	0,0008

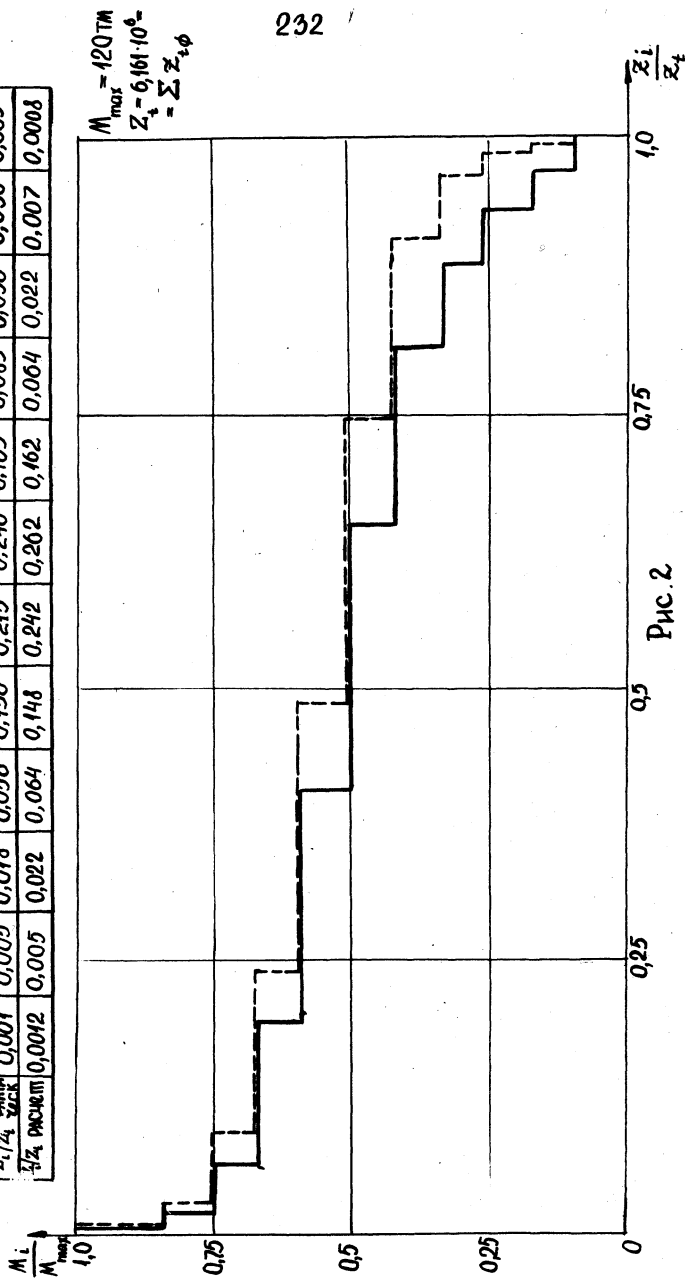


Рис. 2

метода, т.е. введение систематизации нагрузок по группам с фиксированной средней нагрузкой, последующая разбивка всего диапазона нагрузок на ограниченное число интервалов для подсчета частот по интервалам на основе нормального закона распределения и использование выражения (4) позволяют построить расчетный суммарный график нагружения стана и выполнить достоверное определение расчетной нагрузки в виде эквивалентной, а также найти частоту появления и величины максимальной нагрузки для любого заданного сортамента стана или программы загрузки технологического оборудования с учетом известного разброса уровней нагружения, не проводя широких натурных исследований нагруженности стана и трудоемких вычислений при обработке результатов замеров. Такой же подход благодаря универсальности метода может быть осуществлен и при анализе работы прокатных станов других типов, а также различного механического оборудования, работающего при регулярных процессах нагружения.

На основе рассмотренной методики с использованием (5) был проведен расчет долговечности и работоспособности пилигримового стана, что позволило оценить оптимальный вариант годового сортамента стана, выявить слабые звенья в его главной линии и дать соответствующие

рекомендации по их усилению и повышению производительности оборудования.

Л и т е р а т у р а

1. А.И.ЦЕЛИКОВ. Теория расчета усилий в прокатных станах. Металлургиздат, 1962.
2. С.В.СЕРЕНСЕН и др. Прочность при нестационарных режимах нагрузки. Изд. АН УССР, 1961.
3. Д.Н.РЕШЕТОВ. Расчет деталей станков на прочность. Сб. "Прочность при неустановившихся режимах переменных напряжений". АН СССР, 1954.
4. А. УОРСИНГ, Д.Ж.ГЕФФНЕР, Методы обработки экспериментальных данных. Изд. И.Л, Москва, 1949.
5. В.П.АНИСИФОРОВ, Л.В.КОНОВАЛОВ, В.Д.КУРГАНОВ, А.И.МАЛЬЦЕВ. Анализ работоспособности линии приводов прокатного оборудования с учетом спектра нагрузок. Труды ВНИИМЕТМАШ, сб. № 22, М., 1969.

Таблица 1

Количество нагружений N_i в год (по $M_{кр}$)

№ п/п	Сортамент Интервал нагрузки (М), тм	Труба	Труба	Труба	Труба	Труба
		$\phi 325 \times 10$ (Ст. 20)	$\phi 225 \times 5$ (12Х1 МФ)	$\phi 351 \times 9$ (Ст. 2)	$\phi 351 \times 10$ (Ст. 20)	$\phi 351 \times 11$ (Ст. 20)
I. 5, I - 15,0		4	I	-	-	3
2. 15, I- 25,0		23	I7	-	4	3
3. 25, I- 35,0		107	II6	19	9	7
4. 35, I- 45,0		312	137	98	31	22
5. 45, I- 55,0		339	4	230	129	61
6. 55, I- 65,0		135	-	261	280	110
7. 65, I- 75,0		19	-	34	114	138
8. 75, I- 85,0		2	-	12	25	57
9. 85, I- 95,0		-	-	-	3	16
10. 95,0-I05,0		-	-	-	I	4
11. 105, I-II5,0		-	-	-	I	I
12. 115, I-I25,0		-	-	-	-	-
N_i		941	275	654	597	422
Ср. крут. момент ($M_{ср}$), тм		45,4	34,6	53,5	59,1	64,0
Ср. квадр. отклонение (σ), тм		10,5	6,5	9,6	10,7	14,3
Кoeff. вариации ν		0,232	0,183	0,180	0,181	0,224

Продолжение табл. 1

№ №: п/п:	Сортамент:	Труба	Труба	Труба	Труба	Труба
		№ 351х х 12мм (Ст.4)	№ 351х х 22мм (Ст.20)	№ 377х х 10мм (Ст.20)	№ 426 х х 10, II (Ст.10, 20)	№ 465х х 15, 16мм (Ст. 20, 38хА)
I.	5, I - 15,0	-	-	-	-	-
2.	15, I - 25,0	I	2	12	10	8
3.	25, I - 35,0	I	9	40	23	29
4.	35, I - 45,0	15	38	109	185	104
5.	45, I - 55,0	51	192	365	514	237
6.	55, I - 65,0	159	169	573	823	428
7.	65, I - 75,0	201	24	719	478	344
8.	75, I - 85,0	117	4	548	254	186
9.	85, I - 95,0	13	-	339	84	81
10.	95,0 - 105,0	6	-	121	35	27
II.	105, I - 115,0	I	-	26	18	7
12.	115, I - 125,0	-	-	4	4	5
	N_i	565	438	2856	2428	1456
	Ср. крут. момент ($M_{ср}$), тм	67,3	53,8	70,0	62,4	63,9
	Ср. квадр. отк- лонение (σ), тм	11,4	8,65	16,2	14,5	15,4
	Кoeff. вариации ν	0,170	0,161	0,230	0,232	0,240

Продолжение табл. 1

№ №: п/п:	Сортамент	Труба ϕ	Труба	Труба	Труба	Труба
		$\phi 465 \times 22$	$\phi 465 \times 21,5$	$\phi 465 \times 28$	$\phi 465 \times 45$	$\phi 485 \times 30$
	Интервал на- грузки (М), тм	мм (Ст. D)	мм (40XН МА)	мм (12X1MФ)	мм (Ст. 20)	мм (Ст. 20)
I.	5, I - 15,0	-	-	-	-	I
2.	15, I - 25,0	10	2	-	I	7
3.	25, I - 35,0	19	22	4	II	38
4.	35, I - 45,0	84	90	8	46	I34
5.	45, I - 55,0	173	320	27	I35	242
6.	55, I - 65,0	254	298	61	I40	II8
7.	65, I - 75,0	183	21	I88	22	28
8.	75, I - 85,0	86	8	I31	5	6
9.	85, I - 95,0	23	-	33	-	I
10.	95,0 - 105,0	5	-	5	-	-
11.	105, I - 115,0	-	-	I	-	-
12.	115, I - 125,0	-	-	-	-	-
	N_i	837	761	458	360	575
	Ср. крут. мо- мент ($M_{ср}$), тм	60,0	52,9	71,3	53,6	49,7
	Ср. квадр. отк- лонение (σ), тм	14,1	8,77	11,65	9,5	10,7
	Коэфф. вариации ν	0,235	0,166	0,164	0,177	0,215

Таблица 2

Количество нагружений \mathcal{N}_i в год (по Р)

№ №: п/п:	Сортамент Интер- вал на- грузки (Р), т	Труба	Труба	Труба	Труба ϕ
		ϕ 351x 9 мм (Ст.20)	ϕ 351x 11 мм (Ст.20)	ϕ 351x12 мм (Ст.20)	351x22мм (Ст.20)
I.	I5I - 250	-	-	-	I
2.	25I - 350	-	-	I	4
3.	35I - 450	-	-	I	I6
4.	45I - 550	-	9	2	I23
5.	55I - 650	7	34	22	209
6.	65I - 750	40	99	73	7I
7.	75I - 850	I49	II4	II2	I3
8.	85I - 950	I88	II2	84	I
9.	95I - I050	228	48	64	I
IO.	I05I -II50	II8	6	5	-
II.	II5I -I250	26	-	I	-
I2.	I25I -I350	7	-	-	-
	\mathcal{N}_i	763	422	365	438
	Ср. давление ($P_{ср}$), т	942	807	825	584
	Квадратичное отклонение (σ), т	I30	I26	I30	9I
	Коэффициент вариации γ	0, I38	0, I56	0, I57	0, I55

Таблица 3

Количество нагружений z_{Mq} по группам нагрузки с общей средней $M_{срq}$, в совокупности представляющих установившиеся нагрузки годового сортамента пильгерстана

№ №: I/II: M _{ср}	M	10	20	30	40	50
1.	35	490	8474	34984	34984	8474
2.	40	I	I2	60	I04	60
3.	45	-	II79	6599	I5584	I5584
4.	50	-	828	47I7	I3324	I8938
5.	55	-	I02	578	I8I7	3243
6.	60	-	2047	II095	36866	76540
7.	65	-	I29I3	67502	230549	5250I3
8.	70	-	664I	32739	II2950	27I266
9.	75	-	-	I33	456	II60
10.	$\sum z_{t_p}$	49I	32I96	I58407	446634	920278

$\sum z_{t_{\phi}}$ - фактическое число циклов нагружений (от установившихся нагрузок для всех t типоразмеров труб).

$\sum z_{t_p}$ - расчетное число циклов нагружения (от установившихся нагрузок для всех t типоразмеров труб).

Продолжение табл 3

№ №: П/П: : M _{ср}	M	:			
		60	70	80	90
I.	35	490	-	-	-
2.	40	I2	I	-	-
3.	45	6599	II79	-	-
4.	50	I3324	47I7	828	-
5.	55	3243	I8I7	578	I02
6.	60	97957	76540	36866	II095
7.	65	7924II	7924II	5250I3	230549
8.	70	46653I	556563	46653I	27I266
9.	75	2I43	2928	2928	2I43
10.	$\sum z_{tp}$	I3827I0	I436I56	I032744	5I5I55

Продолжение табл. 3

№ №: п/п:	M	I00	I10	I20	$\sum z_{t\phi}$
	M _{ср}				
1.	35	-	-	-	87896
2.	40	-	-	-	250
3.	45	-	-	-	46724
4.	50	-	-	-	56676
5.	55	-	-	-	11480
6.	60	2047	-	-	351053
7.	65	67502	12913	-	3256776
8.	70	112950	32739	6641	2336817
9.	75	1160	456	133	13640
10.	$\sum z_{t\rho}$	183659	46108	6774	6161312

Таблица 4

Значения коэффициента вариации
 ν_i , χ^2 и P_{χ^2} для некоторых
 типоразмеров труб

№ №: п/п:	Типоразмер трубы	:Сред- ний:	К-во замен- енных:	:Сред- нее квад- ратич- ное откло- нение:	:Кoeff- фици- ент ва- риа- ции, ν_i	:Кoeff- фици- ент ва- риа- ции, χ^2	:Веро- ят- ность, P_{χ^2}
1.	ϕ 325x10мм (Ст.20)	45,4	941	10,5	0,232	10,5	0,10
2.	ϕ 377x10мм (Ст.20)	70,0	2856	16,2	0,230	15,4	0,04
3.	ϕ 465x22мм (Ст.)	60,0	837	14,1	0,235	10,3	0,18

ПРИМЕЧАНИЕ: Обычно распределение выборки счита-
 ется близким к нормальному,
 если $P_{\chi^2} \geq 0,01$.