

УДК 338.312

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНАЛИЗА СТРУКТУР ПРОЦЕССОВ
ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ТЕОРИИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МАШИН
(НА ПРИМЕРЕ МАШИН-РЫХЛИТЕЛЕЙ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ И ГОРНЫХ ПОРОД)**

*д-р экон. наук, проф. Н.А. ДУБРОВСКИЙ, Е.С. ВЕРЕТЕННИКОВА, О.А. КАМЕКО
(Полоцкий государственный университет)*

Выявлена необходимость исследования управления производительностью труда рабочих машин. Описаны процессы разрушения мерзлого грунта путем рыхления, которое может осуществляться с помощью откола от массива глыб и разделения его на блоки. Изложена методика анализа структур процессов на примере развития процессов разрушения мерзлого грунта, позволяющая производить оценку производительности машин-рыхлителей с учетом влияния технических и технологических факторов.

***Ключевые слова:** теория производительности машин, производительность, анализ структур процессов, рыхление мерзлых грунтов, подбор механизмов.*

Введение. Проблема управления производительностью занимает одно из центральных мест в экономике любой страны. Управление производительностью это чрезвычайно сложный и многогранный процесс, охватывающий все стороны функционирования народного хозяйства. По мнению некоторых авторов [1; 2], проблема управления производительностью включает в себя сложный комплекс вопросов ее измерения, анализа, планирования и стимулирования. Правильное измерение производительности труда имеет большое значение для объективной оценки имеющихся резервов, соизмерения уровня производительности труда в различных организациях, выявления ее динамики за ряд лет. Производительность используется в оперативном планировании и управлении, при составлении технических заданий на проектирование новых машин, для оценки совершенствования их конструкции, характеристики эксплуатационных качеств и др.

Существующие в настоящее время методы позволяют измерять производительность живого труда. Однако, учет только затрат живого труда нередко сопровождается перерасходом овеществленного труда. Исследования и практика показывают, что в связи с внедрением в производство результатов НТП, заменой ручного труда машинным, необходимо заниматься вопросами производительности общественного труда, т.е. экономией затрат живого и овеществленного труда.

В современных условиях перехода на преимущественно интенсивный путь развития все более возрастает роль прошлого труда, овеществленного в средствах труда, т.е. машинах. Количество овеществленного труда, перенесенного на продукт, в значительной степени зависит от производительности машин, т.е. повышением эффективности прошлого труда можно управлять, изменяя производительность рабочих машин. Поэтому теории производительности рабочих машин всегда уделялось и уделяется особое внимание. Существуют различные мнения относительно производительности рабочих машин. Имеются исследования, авторы которых предлагают для измерения машинной производительности сопоставлять между собой показатели, отражающие их технические характеристики [3; 4]. Рядом авторов выдвинуто положение о необходимости разработки теории производительности машин, построенной на базе изучения рабочих процессов и их структур [5–7]. Однако, следует отметить и то, что наряду с достигнутыми успехами все еще имеются недостатки. Так, в ряде исследований рассматриваются только структуры процессов машин, вошедших в классификации, в других исследованиях не выявлена связь между качественными и количественными сторонами того или иного процесса, рассматриваются не все возможные методы изменения структур и т.д. Поэтому необходимо рассмотреть процессы производства конечной продукции, отличающиеся друг от друга составом количественного критерия, и провести анализ структур процессов при применении всех возможных методов, изменяющих структуру процесса или величину производительности.

Анализ развития процессов производится следующим образом. Записывается формула затрат времени при производстве какой-либо продукции. Изменение состава элементов затрат времени в формуле и их значений дает возможность судить об изменении самого процесса и его производительности.

В общем случае элементы затрат времени, то есть количественную характеристику процессов и их производительность, можно изменять следующими методами:

- 1) уменьшением элементов затрат времени за счет увеличения скорости выполнения отдельных приемов;
- 2) параллельно-последовательным или параллельным выполнением отдельных приемов производства продукции;
- 3) сокращением затрат времени за счет ликвидации отдельных приемов при производстве продукции.

Первый из вышеназванных методов дает возможность сократить время выполнения процесса, то есть изменить его производительность. Однако он не является показательным с точки зрения анализа развития

процесса, поскольку состав его формулы при этом не меняется. При изучении развития процессов целесообразно использовать второй и третий методы, которые позволяют изменять структуру формулы процесса.

Рассмотрим применение данной методики анализа на примере развития процессов подготовки мерзлых грунтов и горных пород к выемке путем рыхления.

Рыхление может осуществляться путем откола от массива глыб и разделением его на блоки. Процесс рыхления мерзлого грунта путем откола от массива глыб может протекать следующим образом. Рабочий орган (клин) устанавливается на определенном расстоянии от забоя. Под действием падающего груза клин внедряется в мерзлый грунт и отделяет от массива глыбу. После откола глыбы весть рабочий орган перемещается на следующую рабочую позицию, где процесс отделения повторяется. Поскольку в большинстве случаев, особенно при разработке котлованов, рыхление осуществляется захватками, то после разрушения грунта на одной захватке машина переезжает на другую.

Процесс рыхления мерзлого грунта путем откола от массива глыб может состоять из следующих операций: сцепления каретки с грузом и рабочим органом t_{cp} , подъема рабочего органа и груза в транспортное положение t_{nm} , переезда машины на новую позицию t_p , опускания рабочего органа на грунт t_o , расцепления груза с кареткой t_{pk} , падения груза t_{nz} , опускания каретки на груз $t_{ок}$, сцепления каретки с грузом t_c , подъема груза t_{noz} , переезда машины на новую захватку t_{nz} .

Необходимо отметить, что для отделения глыбы от массива в некоторых случаях необходимо нанести несколько ударов n грузом по рабочему органу. Кроме того, время переезда машины с одной захватки на другую, как правило, распределяется на m позиций одной захватки.

В общем виде длительность процесса отделения одной глыбы (элемента) мерзлого грунта количественно может быть выражена зависимостью

$$t_{np} = t_{cp} + t_{nm} + t_{nn} + t_p + t_o + nt_{nn} + nt + nt_c + nt_{noz} + m^{-1}t_{nz}. \quad (1)$$

Формуле (1) соответствует следующий процесс разрушения мерзлого грунта. После отделения некоторого объема грунта от массива производится сцепление рабочего органа и груза с кареткой и подъем их в верхнее транспортное положение. Затем машина переезжает на новую позицию, где производится расцепление груза с рабочим органом, опускание последнего на грунт, расцепление груза с кареткой и падение его на рабочий орган. После нанесения удара грузом по рабочему органу и внедрения последнего на некоторую величину в мерзлый грунт, каретка опускается на груз, сцепляется с ним и подъемным механизмом, поднимается в верхнее положение. Там происходит расцепление груза с кареткой. Груз падает, наносит удар по рабочему органу и последний внедряется в грунт. Каретка вновь опускается, и все повторяется до тех пор, пока от массива не отделится глыба, после чего машина переезжает на новую позицию. Разрыхлив мерзлый грунт на определенном отрезке, машина переезжает на новую захватку, где процесс рыхления повторяется так же, как и на первой захватке.

Формула (1) несет информацию о том, какие и в какой последовательности выполняются приемы для осуществления определенного принципа разрушения. Она соответствует циклическому разрушению мерзлого грунта расклинивающим действием рабочего органа, о чем свидетельствует наличие в формуле времени переезда машины на новую позицию t_{nn} . Ударный принцип работы машины учитывается составляющими t_{nz} и t_{noz} . Степень механизации процесса в выражении (1) учитывается составляющими, отражающими число несомкнутых, последовательно выполняемых операций. Технология рыхления отражена составляющими t_{nm} (машина рыхлит, удаляясь от забоя) и t_{nz} (достигнув конца параллельной захватки, переезжает на новую). Наконец, теми же составляющими в зависимости (1) учитываются и размеры разрабатываемого объекта.

При анализе развития структуры процесса по вышеприведенной методике последовательность совмещения (приравнивание к нулю) отдельных составляющих формулы (1) устанавливается исходя из условий повышения степени механизации и автоматизации процесса рыхления на основе опыта создания машин-рыхлителей мерзлого грунта и совершенствования организации работ.

Пусть $t_{pk} - \tau_{pk} = 0$, где τ_{pk} – время совмещения расцепления груза с кареткой с другими приемами (в дальнейшем время параллельного выполнения различных приемов обозначается τ с соответствующим индексом). Тогда

$$t_{np} = t_{cp} + t_{nm} + t_{nn} + t_p + t_o + nt + nt_{nz} + nt_{ок} + nt_c + nt_{noz} + m^{-1}t_{nz}. \quad (2)$$

Совмещение времени расцепления груза с кареткой повышает степень механизации управления ударным механизмом. Так, во время подъема груза в верхнее положение фиксатор, соединяющий его с кареткой, по ходу движения получает импульс на отключение и разъединяет каретку с грузом, после чего тот падает.

Если $t_{pk} - \tau_{pk} = 0$ и $t_c - \tau_c = 0$, то

$$t_{np} = t_{cp} + t_{nm} + t_{nn} + t_p + t_o + nt_{nz} + nt_{ок} + nt_{noz} + m^{-1}t_{nz}. \quad (3)$$

Структурный состав формулы (3) говорит о том, что для подъема груза применяется более совершенный механизм, чем представленный в зависимости (2). Он позволяет производить автоматическое сцепление и расцепление груза с кареткой, выполняемые при опускании и подъеме последней.

В случае $t_{np} - \tau_{np} = 0$, $t_c - \tau_c = 0$ и $t_{n2} - \tau_{n2} = 0$ формула (1) принимает вид

$$t_{np} = t_{cp} + t_{nm} + t_{nn} + t_p + t_o + nt + n(t_{ок} - \tau_{ок}) + nt_{noz} + m^{-1}t_{n3}. \quad (4)$$

Из формулы (4) видно, что помимо t_{pk} , t_c совмещено и падение груза, которое можно выполнять параллельно времени опускания каретки. Кроме того, в данном случае время $t_{ок}$ будет частично совмещено с временем τ , поэтому в формулу (4) введена величина $\tau_{ок}$.

При $t_{pk} - \tau_{pk} = 0$, $t_c - \tau_c = 0$, $t_{n2} - \tau_{n2} = 0$ и $t_{cp} - \tau_{cp} = 0$ имеем

$$t_{np} = t_{nm} + t_{nn} + t_p + t_o + n(t + t_{ок} - \tau_{ок} + t_{noz}) + m^{-1}t_{n3}. \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что процесс, связанный с подъемом груза и рабочего органа, более совершенный, чем для всех вышеописанных структур. Практически это можно осуществить установкой автоматической сцепки груза и рабочего органа.

Когда $t_{pk} - \tau_{pk} = 0$, $t_c - \tau_c = 0$, $t_{n2} - \tau_{n2} = 0$, $t_{cp} - \tau_{cp} = 0$ и $t_p - \tau_p = 0$, то это приводит в свою очередь к совмещению времени опускания рабочего органа на грунт с временем подъема груза, то есть $t_o - \tau_o = 0$. Тогда

$$t_{np} = t_{nm} + t_{nn} + n(t + t_{ок} - \tau_{ок} + t_{noz}) + m^{-1}t_{n3}. \quad (6)$$

Если $t_{pk} - \tau_{pk} = 0$, $t_c - \tau_c = 0$, $t_{n2} - \tau_{n2} = 0$, $t_{cp} - \tau_{cp} = 0$, $t_p - \tau_p = 0$, $t_o - \tau_o = 0$ и $n = 1$, то произойдет совмещение времени подъема рабочего органа с временем подъема груза, то есть $t_{nm} - \tau_{nm} = 0$. В данном случае структурная формула процесса рыхления будет иметь вид:

$$t_{np} = t_{nm} + t + (t_{ок} - \tau_{ок}) + t_{noz} + m^{-1}t_{n3}. \quad (7)$$

Из формулы (7) видно, что разрушение мерзлого грунта ведется машиной одноударного действия. Следовательно, $n = 1$ соответствует тому случаю, когда машина может разрушить мерзлый слой грунта любой толщины за один удар падающего груза по рабочему органу или глубина промерзания позволяет рыхлить грунт за один удар, или производится послойное рыхление.

При $t_{cp} - \tau_{cp} = 0$, $t_p - \tau_p = 0$, $t_o - \tau_o = 0$, $t_{nm} - \tau_{nm} = 0$, $n = 1$ и $t_{ок} = 0$ будем иметь и $t_c = 0$. Тогда

$$t_{np} = t_{nm} + t_{n2} + t + t_{noz} + m^{-1}t_{n3}. \quad (8)$$

Отсутствие времени $t_{ок}$ вызывает в свою очередь и ликвидацию затрат времени на сцепление каретки с грузом и их расцепление. Однако в структурной зависимости появляется время падения груза, которое было совмещено с опусканием каретки. А это требует осуществления изменений в конструкции машины, в частности, в подъемном механизме и соединении груза с подъемным механизмом.

Можно предположить, что груз будет подниматься вверх и падать вниз, оставаясь все время связанным с тросом подъемного механизма.

Если в формуле (8) приравнять к нулю t_{n3} , то она примет вид:

$$t_{np} = t_{nm} + t_{n2} + t + t_{noz}. \quad (9)$$

Отсутствие времени переезда машины с одной захватки на другую может быть в том случае, когда рыхление мерзлого грунта производится не захватками, как было описано выше, например, по «шахматной» технологии, то есть отсутствие времени свидетельствует об изменении технологии рыхления. Либо рыхление мерзлого грунта производится на объекте, ширина которого не превышает ширины следа рыхления, оставляемого машиной (например, разработка траншей).

При соответствующей квалификации оператора подъем груза (после извлечения рабочего органа из мерзлого грунта) может быть совмещен с переездом машин с одной позиции на другую. Тогда

$$t_{np} = t_{nm} + t_{n2} + t + t_{noz} - \tau_{noz}. \quad (10)$$

Составу формулы (10) соответствует следующий процесс разрушения мерзлого грунта. После отделения глыбы от массива клин вместе с грузом начинает подниматься вверх, и, как только его нижняя кромка достигнет поверхности грунта, машина начинает переезд с одной позиции на другую при непрерывающемся подъеме груза с клином. Когда переезд закончен, груз и рабочий орган расцепляются и последний падает на грунт, а груз поднимается выше. Достигнув верхнего положения, груз падает вниз, ударяет по клину, заставляя его внедриться в грунт и отделить глыбу от массива, сцепляется с ним, и процесс повторяется.

Дальнейшее совершенствование процесса рыхления машинами ударного действия за счет расклинивания возможно путем применения сложных рабочих органов (например, шагающего типа).

Варьируя количество рабочих органов, можно добиться того, что в любой момент времени хотя бы один из них внедряется в грунт. Все вспомогательные приемы у других рабочих органов выполняются параллельно t .

В этом случае количественно процесс разрушения может быть выражен зависимостью $t_{np} = t$.

Таким образом, при разрушении мерзлого грунта путем расклинивающего действия рабочего органа совмещение времен t_{nc} , t_{noc} и t_{nn} возможно только в случае применения сложных рабочих органов.

Совмещение переезда машины с одной позиции на другую с другими операциями ($t_{nn} - \tau_{nn} = 0$) возможно не только в случае применения сложных рабочих органов, например, шагающего типа. Время t_{nn} может быть совмещено со всеми другими приемами, исключая t_{n3} . Но поскольку все приемы, связанные с рыхлением, выполняются во время движения машины, в частности и само рыхление, то, следовательно, изменяется и механизм разрушения мерзлого грунта. В данном случае разрушение происходит как за счет расклинивающего действия рабочего органа, так и за счет напорного движения машины.

При разрушении мерзлого грунта путем разделения его на блоки возможны затраты времени на: t – непосредственное разрушение грунта; t_3 – заглубление рабочего органа; t_n – подъем рабочего органа; t_{nn} – переезд на новую позицию; t_{n3} – переезд на новую проходку; t_u – замену инструмента.

В общем виде процесс разрушения может быть следующим.

Машина внедряет рабочий орган на требуемую глубину и разрушает грунт на всей захватке. В конце щели (борозды рыхления) рабочий орган поднимается, и машина переезжает на новую проходку.

При совмещении затрат, связанных с заменой инструмента ($n = 1, t_{nn} = 0, t_u - \tau_u = 0$), получается

$$t_{np} = t_3 + t + t_n + t_{n3}.$$

Замена вышедшего из строя инструмента может быть совмещена с выполнением других приемов за счет изменения конструкции рабочего органа или повышения стойкости инструмента. Например, при стойкости, обеспечивающей непрерывную работу инструмента в течение полусмены или полной смены, можно производить замену вышедшего из строя инструмента в обеденный перерыв или между сменами.

Если $n = 1, t_{nn} = 0, t_u - \tau_u = 0, t_n = 0, t_3 = 0, t_{n3} = 0$, то $t_{np} = t$.

Такая зависимость отражает процесс разрушения мерзлого грунта, где все время расходуется только на рыхление. Это требует применения машин с высокой степенью автоматизации, использования инструмента высокой стойкости и специальных рабочих органов, применения технологии, позволяющей производить разрушение без холостых переездов машины.

Таким образом, изложенная методика анализа развития структур процессов позволяет производить их количественную оценку. На основе изучения зависимостей, отражающих принцип разрушения мерзлых грунтов и горных пород, принцип работы машины-рыхлителя и технологии рыхления, можно дать заключение о степени совершенства машины-рыхлителя, а также механизации и автоматизации процесса разрушения в целом. Данная методика позволяет определить значимость того или иного показателя в структуре процесса и его развитии, подойти с научной точки зрения к определению производительности машин-рыхлителей и способов подготовки мерзлым грунтам и горным породам к выемке.

Анализ развития структур процессов показал, что в конечном итоге длительность любого процесса независимо от его сущности может быть сведена к длительности основной производственной операции, то есть $t_{np} = t$. Производительность процесса обратно пропорциональна его длительности, т.е.

$$Q = \frac{1}{t_{np}} = \frac{1}{t}.$$

Величина $1/t$ пропорциональна средней скорости перемещения рабочего органа машины в процессе работы v , поэтому можно записать

$$Q = v, \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Производительность машин-рыхлителей может быть также определена по зависимости:

$$Q = vF_{cp}, \text{ м}^3/\text{ч},$$

где F_{cp} – средняя площадь поперечного сечения следа рыхления, м^2 .

Производительность машин, предназначенных для подготовки мерзлого грунта к выемке, зависит от технологии рыхления, но несмотря на различия в принципах работы различных машин-рыхлителей, она может быть определена по общей зависимости:

$$Q = \frac{\partial F k_y k_g k_r}{S},$$

где k_y, k_g – коэффициенты, учитывающие влияние соответственно свойств и глубины разрезания грунта;

k_r – коэффициент, учитывающий потери времени на вспомогательные операции. Величина этого коэффициента может быть определена из выражения

$$k_r = \frac{T}{T + T_B},$$

где T и T_B – соответственно продолжительность чистой работы машины и время, расходуемое на вспомогательные операции;

S – величина, характеризующая соотношение между объемами разрыхленного рабочим органом грунта V_1 и подготовленного к разработке выемочной машиной V , и определяется по формуле

$$S = V_1/V,$$

При использовании щелевых машин объем разрыхленного грунта, полученного при образовании щели-траншеи длиной $L_{щ}$, шириной $B_{щ}$ и глубиной H_p составит:

$$V_1 = L_{щ}B_{щ}H_p k_p, \text{ м}^3$$

где k_p – коэффициент рыхления грунта.

Подставим значения V_1 и V и получаем

$$S = \frac{(L_{np}n_1 + L_{no}n_2)F_{щ}}{L_{np}L_{no}H_{np}},$$

где n_1 и n_2 – число параллельно нарезанных на площади щелей, соответственно продольных длина L_{np} и поперечных L_{no} ,

H_{np} – глубина промерзания грунта.

Заменив в последнем выражении n_1 и n_2 через L_{np} и L_{no} и расстояние между центрами продольных l_1 и поперечных l_2 щелей и проведя соответствующие преобразования, получим:

$$S_{щ} = \left(\frac{1}{l_1} - \frac{B_{щ}}{l_1 L_{no}} + \frac{1}{L_{no}} + \frac{1}{l_2} - \frac{B_{щ}}{l_2 L_{np}} + \frac{1}{L_{np}} \right) \cdot \frac{F_{щ}}{H_{np}}.$$

Обычно при подготовке мерзлого грунта к выемке щелевыми машинами $H_{щ} = H_{np}$.

Для учета влияния технических и технологических факторов на производительность в зависимости для определения k_r вместо T и T_B подставляем их значения:

$$T = \frac{L}{\vartheta_n}, \quad T_B = T_3 + T_{nop} + T_{np},$$

где L – длина нарезанной щели, м;

$T_3 = \frac{\beta_o - \beta}{\omega_3}$ – продолжительность заглабления рабочего органа со скоростью ω_3 ;

$\beta_o - \beta$ – угол поворота рабочего органа при заглаблении на величину $H_{щ}$;

$T_{nop} = \frac{\beta_o - \beta}{\omega_n}$ – продолжительность подъема рабочего органа со скоростью ω_n ;

$T_{np} = \frac{L_{np}}{\vartheta_{np}}$ – продолжительность переезда машины с одной щели на другую со скоростью ϑ_{np} .

В таком случае выражение для определения k_r примет вид

$$k_r = \frac{1}{\vartheta_n \left\{ \frac{1}{\vartheta_n} + \frac{1}{L} \left[(\beta_o - \beta) \left(\frac{1}{\omega_3} + \frac{1}{\omega_n} \right) + \frac{L_{np}}{\vartheta_{np}} \right] \right\}}.$$

Решая совместное уравнение для определения Q и k_r , получим

$$Q = \frac{Fk_y k_g}{S_{ц} \left\{ \frac{1}{\vartheta_n} + \frac{1}{L} \left[(\beta_o - \beta) \left(\frac{1}{\omega_3} + \frac{1}{\omega_n} \right) + \frac{L_{np}}{\vartheta_{np}} \right] \right\}}, \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Заключение. Таким образом, изложенная выше методика позволяет оценить производительность машин-рыхлителей с учетом комплекса влияния технических и технологических факторов. Такой подход к определению производительности дает возможность установить целесообразность применения той или иной машины-рыхлителя в зависимости от объемов работ и климатических условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бухневич, В.А. Планирование производительности труда / В.А. Бухневич // Вопросы экономики. – 1976. – № 6. – С. 101–111.
2. Гаврилов, Р.В. Изменение производительности труда в промышленности СССР / Р.В. Гаврилов // Вопросы экономики. – 1976. – № 3. – С. 133–143.
3. Зеленин, А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами / А.Н. Зеленин. – М. : Машиностроение, 1968. – 375 с.
4. Коротаяев, Д.В. О некоторых факторах, влияющих на производительность машин при разработке мерзлых грунтов / Д.В. Коротаяев // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1969. – № 4. – С. 174–180.
5. Усубаматов, Р.Н. О математических моделях производительности технологических машин / Р.Н. Усубаматов, Т.Э. Сартов, А.И. Оморова // Известия Кыргыз. гос. техн. ун-та им. И. Раззакова. – 2018. – № 2(46). – С. 120–127.
6. Баловнев, В.И. определение оптимальных параметров транспортно-технологических машин методами теории подобных преобразований / В.И. Баловнев, Р.Г. Данилов, И.М. Рябикова, Чэн Хайин // Строительные и дорожные машины. – 2019. – № 12. – С. 3–11.
7. Мощностные показатели одноосного колёсного движителя землеройно-транспортных машин / В.А. Жулай [и др.] // Высокие технологии в строительном комплексе. – 2019. – № 1. – С. 124–128.

Поступила 15.09.2020

USING PROCESS STRUCTURE ANALYSIS FOR BUILDING A THEORY OF MACHINE PERFORMANCE (ON THE EXAMPLE OF MACHINES-RIPPERING OF FROZEN SOIL AND ROCKS)

N. DUBROVSKY, E. VERETENNIKOVA, O. KAMEKO

Revealed the need to study the management of labor productivity of working machines. The processes of destruction of frozen soil by loosening are described, which can be carried out by breaking away from the massif of blocks and dividing it into blocks. The methodology for analyzing the structures of processes is presented on the example of the development of processes of destruction of frozen soil, which makes it possible to assess the productivity of rippers taking into account the influence of technical and technological factors.

Keywords: *theory of machine productivity, productivity, analysis of process structures, loosening of frozen soils, selection of mechanisms.*