

УДК 621.9.011:517.962.1

## АНАЛИЗ ЖЕСТКОСТИ ПОДВИЖНОГО ПОРТАЛА ПРОДОЛЬНО-ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА ТИПА «ГЕНТРИ»

**В. И. ТУРОМША, С. С. ДОВНАР,  
ТУМИ ЭЛЬ-МАБРУК АБУЖАФЕР АЛИ**

*Учреждение образования «Белорусский национальный  
технический университет», г. Минск*

**А. С. ТРУСКОВСКИЙ**

*ОАО «Станкостроительный завод «МЗОР», г. Минск,  
Республика Беларусь*

### Введение

Особенностью компоновки продольно-фрезерных станков с подвижным порталом типа «Гентри» является неподвижный стол и перемещающийся вдоль него портал, несущий фрезерно-расточную бабку [1]. Такая компоновка по сравнению с классической, включающей подвижный стол, позволяет уменьшить габариты станка.

Общий вид несущей системы станка представлен на рис. 1. Портал состоит из траверсы, закрепленной на двух стойках, которые смонтированы на саних, перемещающихся по двум параллельным станинам. Бабка состоит из каретки и ползуна, в котором встроен привод вращения основного вертикального шпинделя станка.

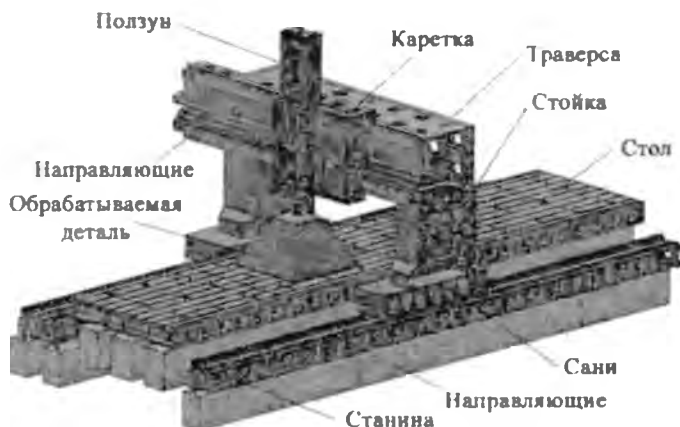


Рис. 1. Несущая система продольно-фрезерного станка с подвижным порталом

Станкостроительное предприятие ОАО «МЗОР» впервые начало осваивать производство таких высокопроизводительных тяжелых продольно-фрезерных станков [2]. Поэтому задача обеспечения требуемой жесткости несущей системы является весьма актуальной. Для ее решения использованы методы математического моделирования [3], которые позволяют не только выявить слабые элементы конструкции, но и осуществить виртуальные испытания ряда вариантов и выбрать наиболее эффективные из них. Экспериментальным путем решение такой задачи невозможно из-за условий единичного производства, а также высоких материальных затрат, связанных с большими габаритами и массой станков.

### Методика моделирования

Настоящая работа ориентирована главным образом на виртуальные испытания портала станка, включая моделирование с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [3]. Благодаря наличию вертикальной плоскости симметрии станка для упрощения геометрической и конечно-элементной модели далее использована половинная модель портала (рис. 2, а).

Траверса, стойка и сани являются пустотелыми чугунными отливками с развитым внутренним оребрением. При создании их геометрических моделей было предусмотрено также заполнение внутренних полостей материалом, т. е. вставки (рис. 2, б), сопрягающиеся с отливками без зазоров и интерференции. В реальности они могут быть созданы заполнением отливок полимербетоном – относительно распространенным в станкостроении материалом [4]. Полимербетон известен хорошим сцеплением с емкостью, в которую его заливают, удовлетворительной жесткостью, высокими демпфирующими свойствами.

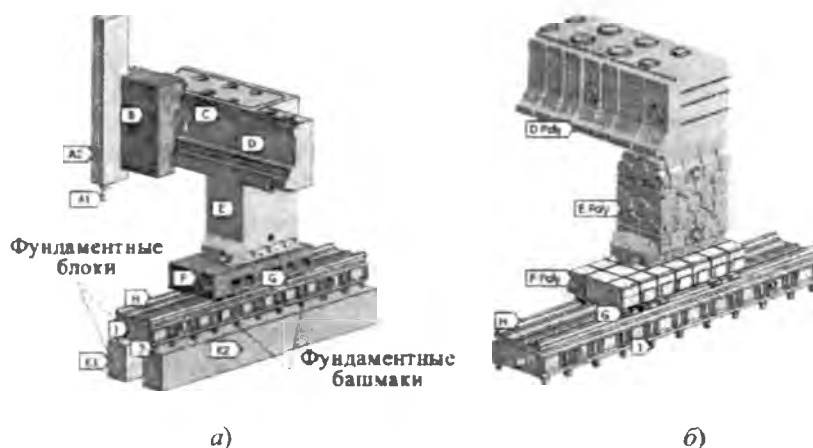


Рис. 2. Половинная модель портала станка (а) и полимербетонные вставки (б)

Характер деформации станка под нагрузкой уже выяснялся в предыдущих исследованиях [5], [6]. Цель данной работы – оценка жесткости именно портала и влияния на нее составляющих деталей. Поэтому навесное оборудование (шпиндельный узел, ползун и каретка) рассматривалось упрощенно как жесткие монолитные тела.

Основная методическая идея работы заключается в поочередном варьировании жесткости деталей портала. Сначала моделировался базовый вариант, максимально приближенный к реальности. Определялись его деформации под тестовой нагрузкой. Тем самым оценивается базовая жесткость портала станка  $R$  (и, как обратная величина, податливость  $K = 1/R$ ). Жесткость определяется как  $R = F/u$ , где  $F$  – приложенная к шпинделю сила;  $u$  – перемещение на конце шпинделя.

Затем жесткость каждой детали портала изменялась двукратно в большую и в меньшую сторону и моделирование повторялось. Это позволяло выяснить важность детали в формировании общей жесткости несущей системы станка и установить чувствительность жесткости всего станка к жесткости именно этой детали. В МКЭ-модели управление жесткостью производилось через умножение модуля упругости материала детали  $E$  на коэффициент варьирования жесткости  $a_{вж}$ . В реальности двукратного изменения жесткости можно достичь утолщением или утончением вдвое стенок отливки. Кроме того, подъем жесткости примерно вдвое происходит при замене чугунной отливки сварной стальной деталью.

Кроме траверсы, стойки и саней, варьирование жесткости производилось также для трех нижележащих деталей – направляющих качения, станины, фундаментных

башмаков. Именно эти шесть деталей образуют портал станка. Направляющие качения для каждой стойки включают 2 комплекта из 1 рельса и 5 опор, а комплект опор станины включает 40 башмаков.

Коэффициент  $a_{вж}$  обычно принимал значения  $1/4, 1/2, 1, 2, 4$ . Для направляющих качения и фундаментных башмаков  $a_{вж}$  варьировали от  $1/16$  до  $2$ .

Портал отображается последовательной цепью из звеньев жесткости (рис. 3). Каждое звено представляет деталь или комплект деталей: бабку (податливость  $k_{б\text{аб}}$ ), траверсу ( $k_{т\text{р}}$ ), стойку ( $k_{с}$ ), сани ( $k_{с\text{ан}}$ ), комплект направляющих качения ( $k_{н\text{к}}$ ), станину (три секции в сборе –  $k_{ст}$ ), комплект фундаментных башмаков ( $k_{б\text{аш}}$ ). Именно в таком порядке передается усилие со шпинделя ( $A1$  на рис. 2, *a*) на фундамент. Любому перечисленному звену  $i$  вместе с податливостью  $k_i$  соответствует жесткость  $r_i = 1/k_i$ . Сумма податливостей звеньев дает податливость всей системы

$$K = k_{т\text{р}} + k_{с} + k_{с\text{ан}} + k_{н\text{к}} + k_{ст} + k_{б\text{аш}} + k_{ост} = \sum k_i, \quad (1)$$

где  $k_{ост}$  – сумма податливостей бабки  $k_{б\text{аб}}$ , направляющих каретки, рельсов направляющих стойки, фундаментных блоков.

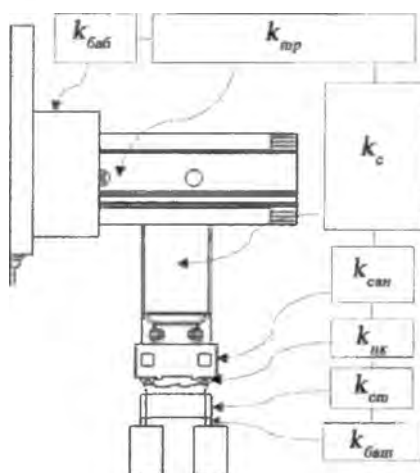


Рис. 3. Схема звеньев жесткости для половинной модели портала станка

Согласно закону Гука, справедливо уравнение

$$u = KF = \left( \sum k_{i-1} + k_i \right) F = \left( \sum k_{i-1} + \frac{1}{r_i} \right) F, \quad (2)$$

где  $\sum k_{i-1}$  – сумма податливостей всех звеньев, кроме некоторого  $k_i$ .

Поскольку в (2) жесткость  $r_i$  стоит в знаменателе дроби, то получается, что перемещение шпинделя и податливость станка  $K$  изменяются по гиперболической зависимости при изменении жесткости любого звена. Рассмотрим это на примере направляющих качения и башмаков.

Каждой опоре направляющих качения по каталогу соответствует жесткость примерно  $3000 \text{ Н/мкм}$ . Жесткость может быть изменена в несколько раз переходом на другой типоразмер (в пределах несущей способности) и регулированием натяга. Для фундаментного башмака была сделана с помощью МКЭ оценка его жесткости с учетом контактных эффектов в клиновом соединении и на опорных поверхностях. Оказалось, что в зависимости от перекосов жесткость меняется от нескольких сотен до десятков тысяч  $\text{Н/мкм}$ .

Получается, что в МКЭ-моделировании портала жесткость опор направляющих качения и башмаков можно варьировать в широком диапазоне без отступления от реальности. Базовая величина жесткости для обоих объектов принята одинаковой  $r_{нк} = r_{баш} = 3000$  Н/мкм, диапазон изменения 187,5–6000 Н/мкм. Обе жесткости влияют на вертикальное перемещение шпинделя  $u_z$  под вертикальной тестовой нагрузкой  $F_z = 1000$  Н по гиперболической зависимости (рис. 4). Обе кривые близки друг к другу. На каждой есть три характерных участка. На индифферентном участке 3 жесткость опоры или башмака почти не влияет на перемещение шпинделя (податливость портала). Это происходит, когда податливость опоры или башмака намного меньше, чем сумма податливостей остальных деталей. В формуле (2) выполняется неравенство  $1/r_i < \sum k_{i-1}$ .

Для активного участка 1 справедливо соотношение  $1/r_i > \sum k_{i-1}$ , т. е. податливость объекта (опоры качения или башмака) намного больше, чем у остальных деталей, и он в основном определяет податливость портала.

Участок 2 является переходным. Податливости всех деталей сопоставимы и  $1/r_i \approx \sum k_{i-1}$ .

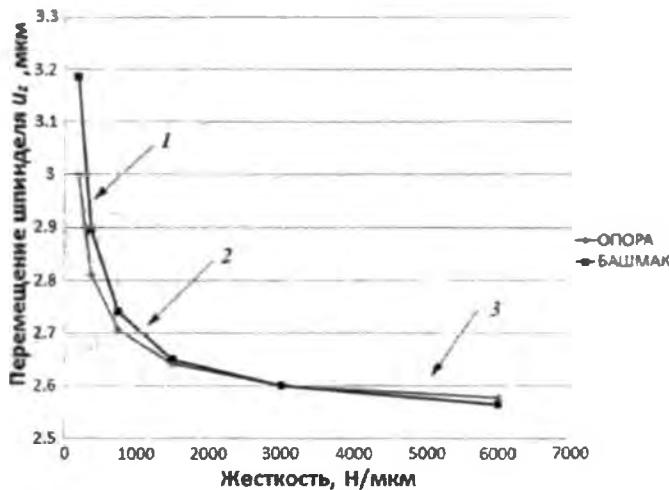


Рис. 4. Влияние жесткости опор направляющих качения и фундаментных башмаков на перемещение шпинделя

Понятно, что жесткость детали надо выбирать такой, чтобы она соответствовала индифферентному или, по крайней мере, переходному участку гиперболы жесткости. На индифферентном участке конкретная жесткость детали не важна. Ее нет смысла увеличивать, так как это почти не влияет на жесткость системы. Например, подъем жесткости опоры качения до 6000 Н/мкм (вдвое больше базовой величины) уменьшает перемещение на шпинделе только на 1,4 %. Аналогичный эффект наблюдается и для башмака.

Жесткость опоры и башмака можно даже уменьшить примерно до 400 Н/мкм ( $a_{вж} = 1/8$ ). Податливость портала возрастет при этом не более чем на 10 %. Дальнейшее снижение жесткости недопустимо, так как начинается активный участок гиперболы жесткости.

Итак, предварительно можно сделать вывод, что существующие опоры направляющих качения и фундаментные башмаки вполне достаточны по жесткости и не требуют первоочередной модернизации.

Варьирование модуля упругости детали портала позволяет численно оценить ее жесткость  $r_i$  (податливость  $k_i$ ) в рамках схемы на рис. 3. Пусть МКЭ-расчет показал перемещение  $u_1$  на шпинделе для силы  $F$  и некоторой, пока неизвестной, податливости звена  $k_i$ . Тогда, согласно (2):

$$u_1 = (\sum k_{i-1} + k_i)F. \quad (3)$$

Уменьшим наполовину модуль упругости и, соответственно, удвоим податливость. При повторении расчета получим перемещение

$$u_2 = (\sum k_{i-1} + 2k_i)F. \quad (4)$$

Зная из МКЭ-расчетов конкретные величины  $u_1$  и  $u_2$ , находим  $k_i$  по формуле, вытекающей из (3) и (4):

$$k_i = \frac{u_2 - u_1}{F}. \quad (5)$$

Аналогичную оценку можно сделать при уменьшении податливости наполовину. Среднеарифметическое оценок дает близкий к реальности результат.

#### Исходные данные для моделирования

Детали портала представляют собой литые конструкции из серого чугуна марки СЧ 20. Для расчетов свойства чугуна приняты следующими:

- модуль упругости  $E = 110$  ГПа;
- коэффициент Пуассона  $\mu = 0,28$ ;
- плотность  $\rho = 7200$  кг/м<sup>3</sup>.

Масса траверсы (в половинной модели) составила 4085 кг, стойки – 1956 кг, сани – 2351 кг, станины – 3032 кг для каждой секции.

Для стальных деталей (направляющие на траверсе и рельсы на станине) принято:

- модуль упругости  $E = 200$  ГПа;
- коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ ;
- плотность  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup>.

Каретка и ползун моделировались как жесткие монолитные тела, способные передавать усилия. Поэтому им назначен модельный материал, модуль упругости которого равен модулю упругости стали. Его плотность подобрана так, чтобы масса суппорта и ползуна в половинной модели была равна 2500 кг. Это соответствует реальному 5-тонному суппорту в сборе.

Модельные материалы направляющих качения и фундаментных башмаков подобраны таким образом, чтобы отдельно взятые направляющая и башмак имели в базовом варианте жесткость по 3000 Н/мкм.

Для полимербетонных вставок в траверсу (6396 кг), колонну (1537) и сани (1314 кг) принято:

- модуль упругости  $E = 30$  ГПа;
- коэффициент Пуассона  $\mu = 0,18$ ;
- плотность  $\rho = 2300$  кг/м<sup>3</sup>.

Такие же механические свойства назначены бетонным фундаментным блокам под станком. Вспомогательные МКЭ-расчеты показали, что упругий отклик блоков примерно эквивалентен размещению под фундаментными башмаками дополнительных пружин жесткостью 2500–3500 Н/мкм.

### Компьютерная модель портала

На рис. 2, а представлена трехмерная модель портала. Навесное оборудование (шпиндельный узел  $A1$  с ползуном  $A2$  на каретке  $B$ ) рассматриваются как жесткие монолитные тела. Каретка через направляющие  $C$  закреплена на траверсе  $D$ . Траверса опирается на стойку  $E$  и сани  $F$ . Сани движутся по рельсам  $H$  с помощью направляющих качения  $G$ . На каждой из двух рельс находится по 5 опор. Рельсы закреплены на станине  $I$  (на рисунке условно показана только средняя секция составной станины). Станина опирается на два ряда регулируемых клиновидных фундаментных башмаков  $J$ . На рис. 2, а они представлены условно в виде прямоугольных стержней над рядами фундаментных блоков  $K1$  и  $K2$ . Эти бетонные блоки заливают в пазах фундамента, который не моделируется.

На рис. 2, б в отсутствие отливок показаны вставка в траверсу « $D Poly$ », вставка в стойку « $E Poly$ » и вставка в сани « $F Poly$ ». Остальные обозначения соответствуют рис. 2, а. Ниже приведены результаты расчетов как с «включенными», так и с «выключенными» полимербетонными вставками.

МКЭ-моделирование производилось в статической постановке. Модель считалась линейно-упругой. На контактах между деталями был установлен режим полного скрепления, без проскальзывания и трения движения. Это скрепление, в частности, заменяло привода подачи станка. Они считались заблокированными.

Контактная податливость не учитывалась. Отсутствовали геометрические нелинейности модели и физические нелинейности материалов. Сетка была построена по 3D-модели из достаточно точных гексаэдрических и тетраэдрических конечных элементов с квадратичной аппроксимацией перемещений. МКЭ-модель включала около 450000 конечных элементов и примерно 2,2 млн степеней свободы.

На рис. 5, а представлена схема закрепления половинной модели портала (вид сверху и снизу). Нижние поверхности фундаментных блоков жестко закреплены ( $FIX$ ). В срединном сечении на поверхности траверсы и суппорта средствами МКЭ наложены условия симметрии ( $SYM$ ). Смоделированы четыре случая нагружения: тестовая сила  $F_Z = 500$  Н действует на шпиндель в вертикальном направлении  $Z$  (направлена вверх) (1); сила  $F_X = 500$  Н действует на шпиндель в продольном направлении  $X$  (2); сила  $F_Y = 500$  Н действует на шпиндель в поперечном направлении  $Y$  (в срединном сечении условия симметрии заменены на условия антисимметрии) (3); станок нагружен собственным весом, сила тяжести действует по направлению  $Z$  вниз (4).

Все тестовые силы приложены к половинной модели портала. Поэтому ниже при оценке жесткости и податливости портала и его деталей полагается, что любая тестовая сила равна 1000 Н. Направление, в котором вдоль данной оси  $X$ ,  $Y$  или  $Z$  действует тестовая сила, не принципиально, так как модель линейна. Первые три случая нагружения соответствуют действию стандартных компонент силы резания. Четвертый случай отражает статическое состояние станка.

### Моделирование портала при нагружении вертикальной силой

На рис. 5, б представлена картина деформации портала под действием силы  $F_Z$  для базового варианта жесткости деталей. Числа на этом и последующих рисунках станка указывают перемещения в микрометрах, в данном случае – вертикальные. Фундаментные блоки под порталом всегда моделируются, но могут быть не показаны для лучшего обозрения конструкции.

Упругой деформации подвергаются все части портала. На траверсе хорошо заметно кручение вокруг ее оси (поперечное направление  $Y$ ). Изгиб визуально представляется менее существенным.

У стойки прямоугольные формы переходят в трапецевидные. Численные отметки 0,56 мкм и 0,27 мкм показывают, что передняя сторона стойки вытягивается вверх сильнее (на 0,29 мкм), чем задняя (0,26 – 0,1 = 0,16 мкм). В основном это обусловлено податливостью носка стойки (выступ передней стороны над отметкой 0,27 мкм).

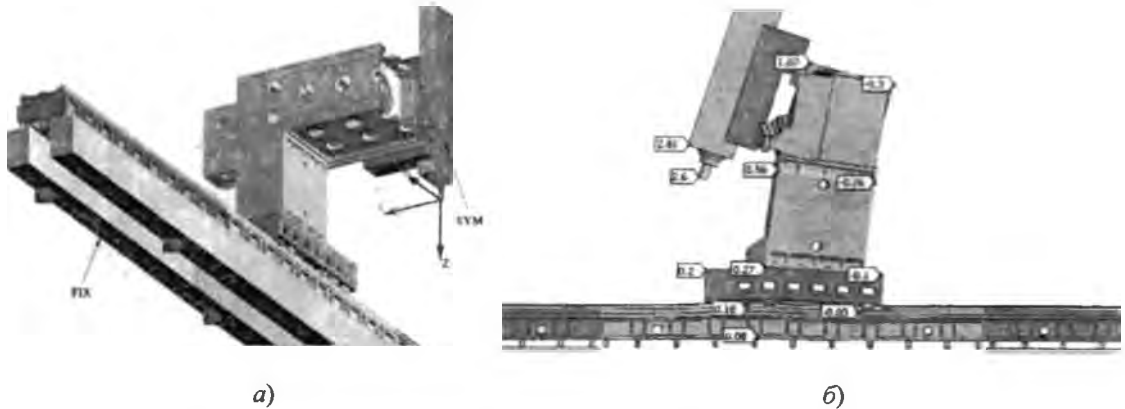


Рис. 5. Схема закрепления модели (а) и деформации портала при нагружении вертикальной силой  $F_z$  (б)

Сани и станина изгибаются вверх и вниз синусоидально. В целом портал подвергается повороту по часовой стрелке. Ось шпинделя отклоняется от вертикали на угол  $\alpha_{xz}$ . Вертикальное перемещение шпинделя составляет  $u_z = 2,6$  мкм и во многом обусловлено указанным поворотом.

Вертикальная жесткость портала составляет –  $R_z = F_z / u_z = 1000 / 2,6 = 385$  Н/мкм. Это небольшая величина, особенно если учесть, что суппорт и шпиндельный узел смоделированы как стилизованные стальные монолиты.

Результаты варьирования жесткости литых деталей портала приведены на рис. 6, а (варьирование опор и башмаков рассмотрено выше). Видно, что вертикальное перемещение  $u_z$  наиболее чувствительно к жесткости траверсы и стойки. Наименее влияющая деталь – станина. Варьирование жесткостью траверсы вдвое дает разные отклики на уменьшении (44,2 %) и на увеличении (28,3 %) жесткости. Следовательно, базовый уровень жесткости траверсы лежит на переходном участке гиперболы жесткости ( $E = 110$  МПа соответствует базовому варианту, и на его уровне все кривые пересекаются). Поэтому траверса и стойка существенно откликаются на изменение  $E$ . Уменьшение их жесткости нежелательно, а увеличение положительно и дает снижение податливости всей системы.

Кривые, соответствующие саням и станине, исходно находятся на границе переходного и индифферентного участков. Уменьшать их жесткость не следует (вход в переходной участок), но и увеличение не актуально (движение по индифферентному участку).

По результатам варьирования была выполнена оценка податливости деталей портала  $k_i$  по формулам (3)–(5). Обратная величина для каждой детали будет называться эффективной жесткостью  $r_i^e$ . Доли податливости деталей в общей податливости портала  $k_i/K$  представлены на диаграмме (рис. 6, б). Подтверждается, что в усилении нуждаются прежде всего траверса и стойка станка. Вместе на них приходится  $k_{тр} + k_c = 68$  % податливости. На третьем месте среди отливок – сани ( $k_{сан} = 9$  %). Башмаки, опоры качения и станина в сумме дают 8 % влияния на податливость. В долю «остальное» ( $k_{ост} = 15$  %) входят податливости монолитных суппорта и ползуна, а также направляющих каретки, рельс и фундаментных блоков.

Отсюда можно заключить, что существенна податливость тех деталей портала, которые контролируют поворот оси шпинделя  $\alpha_{XZ}$ . Поэтому понижать податливость портала надо за счет следующих решений:

- увеличения крутильной жесткости траверсы;
- усиления передней стенки стойки (слабое место стойки при изгибе в плоскости  $XZ$ );
- увеличения изгибной жесткости саней в плоскости  $XZ$ .

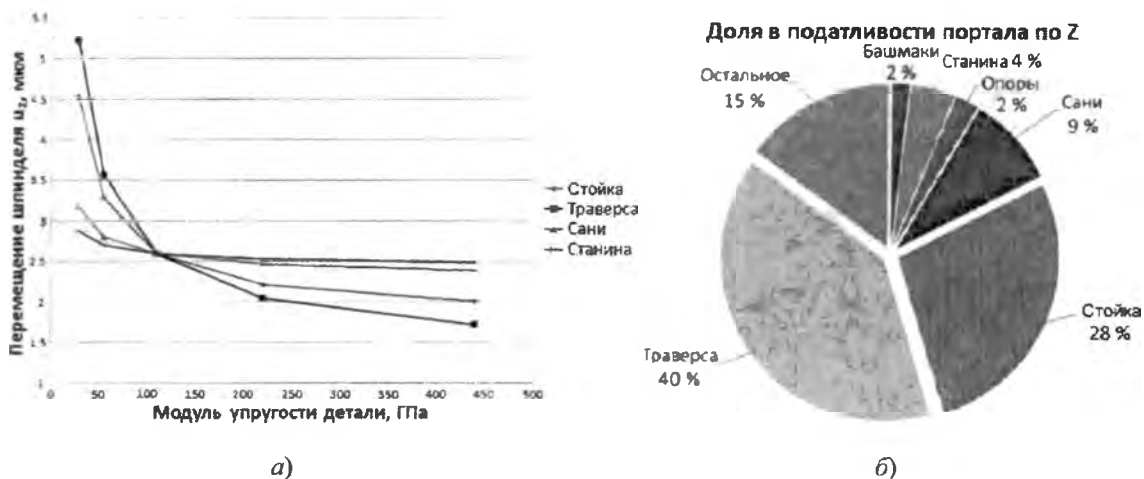


Рис. 6. Влияние варьирования модуля упругости (жесткости) деталей портала на перемещение шпинделя (податливость портала) по оси  $Z$  (а) и доли отдельных деталей в податливости портала (б)

Все эти задачи решаются при заполнении траверсы, стойки и саней полимербетоном. Создаваемая в отливке вставка увеличивает ее жесткость не менее чем в два раза. Например, для стойки виртуальное удвоение жесткости снизило  $u_z$  с 2,6 до 2,22 мкм. Реалистичная же полимербетонная вставка при базовых свойствах чугуна дает  $u_z = 2,15$  мкм.

Благодаря вставкам податливость портала резко уменьшается. Кручение и изгибы малозаметны. Становится жестким носок станины. Удлинение передней стороны колонны не превышает 0,1 мкм, в то время как в базовом варианте (рис. 6, а) из-за податливости носка было отмечено  $0,56 - 0,27 = 0,29$  мкм.

Наиболее эффективна вставка в траверсе. Размещение вставок во всех трех отливках обеспечивает  $u_z = 1,1$  мкм. Жесткость портала возрастает в 2,3 раза.

#### Моделирование портала при нагружении продольной силой

Деформации портала при нагружении вдоль оси  $X$  показаны на рис. 7, а. Виден существенный локальный изгиб на конце шпинделя. Чтобы не учитывать его величиной  $u_x$  считалось перемещение конца ползуна (1,94 мкм вместо 2,5 мкм).

Продольная жесткость портала  $R_x = F_x / u_x = 1000 / 1,94 = 515$  Н/мкм. Это на 75 % больше, чем в вертикальном направлении. Большое различие жесткости портала в разных направлениях нежелательно. Особой проблемой это может оказаться для динамического качества станка.

Особенностью данного случая нагружения является поворотная деформация. Из-за кручения траверсы шпиндель поворачивается против часовой стрелки. Стойка же, деформируя нижележащие детали, поворачивается по часовой стрелке и частично гасит поворот суппорта. Их разностью является угол поворота шпинделя  $\alpha_{XZ}$ .



Ведущей деформацией при продольном нагружении является кручение траверсы. Поэтому траверса отвечает почти за половину податливости портала (рис. 7, б).

Заполнение полимербетоном только траверсы уже очень эффективно для жесткости станка. Крутильные деформации траверсы падают. Ее угол закручивания уменьшается и может стать равным углу наклона стойки. В результате шпиндель может оказаться практически вертикальным ( $\alpha_{xz} \approx 0$ ).

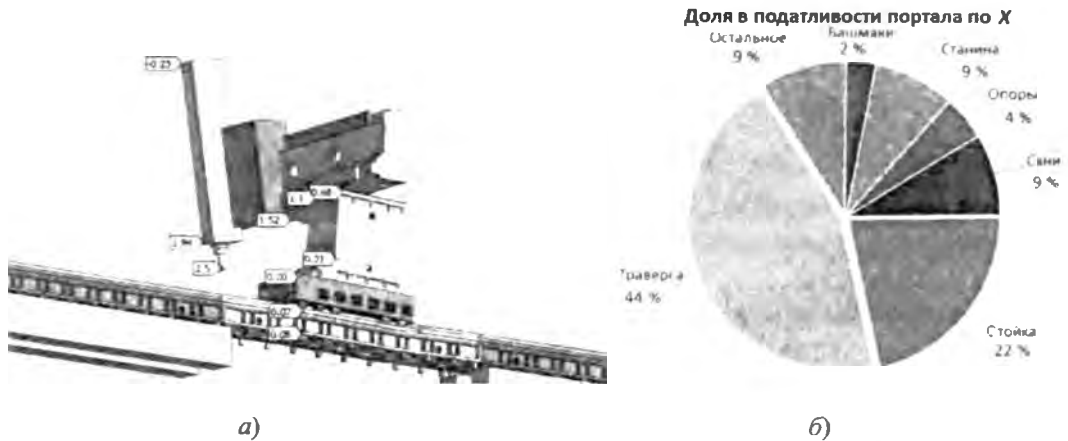


Рис. 7. Картина деформации портала при нагружении силой  $F_x$  (а) и доли отдельных деталей в податливости портала (б)

Получается, что тонким подбором геометрии и упругих свойств полимербетонных вставок можно обеспечить сохранение вертикальности шпинделя при продольном нагружении.

#### Моделирование портала при нагружении поперечной силой

Результаты нагружения портала в поперечном направлении  $Y$  представлены на рис. 8, а. Жесткость портала  $R_y = F_y / u_y = 1000 / 3,41 = 293$  Н/мкм.

Наибольший вклад в деформацию портала вносит боковой наклон стойки. Он определяет сдвиг всей конструкции. Во-первых, стойку слабо удерживают от наклона сани и станина. Последняя деталь довольно легко поддается кручению, и ее недостаточно связывают башмаки. Во-вторых, оказываются податливыми стенки траверсы возле стыка со стойкой. Они локально деформируются и допускают наклон стойки при горизонтальном движении траверсы.

Варьирование жесткостей деталей портала показывает, что конструкция чувствительна, прежде всего, к состоянию стойки. Траверса отступает на второе место.

В податливости портала (рис. 8, б) также большая доля приходится на станину и башмаки – 22 %. При вертикальном нагружении они в сумме занимали 6 %, при продольном – 12 %. Это – результат крутильной податливости станины.

Поперечное нагружение не связано с существенными изгибом или кручением траверсы. Ее доля в податливости обусловлена слабостью района стыка со стойкой.

Применение полимербетонных вставок резко повышает жесткость конструкции. Взаимный поворот траверсы и колонны блокируется. Район их стыка усиливается и превращается в жесткий узел. Перемещение на шпинделе падает с 3,41 до 1,69 мкм, т. е. в 2,0 раза.

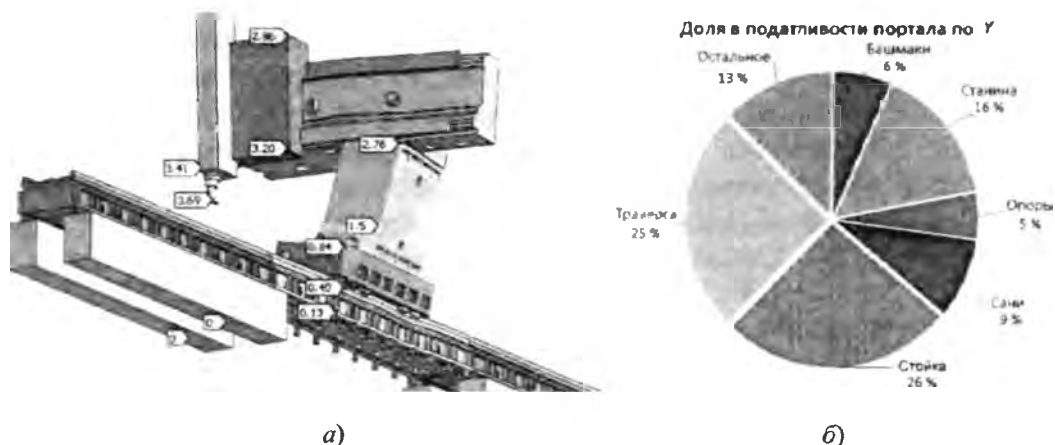


Рис. 8. Картина деформации портала при нагружении силой  $F_Y$  (а) и доли отдельных деталей в податливости портала (б)

### Моделирование портала при нагружении собственным весом

Сила тяжести суппорта – главная статическая нагрузка на портал. Она асимметрична и сосредоточена. Поэтому возникает «клевок» портала – опускание и поворот бабки со шпинделем против часовой стрелки. Статические вертикальные перемещения портала под ее действием силы тяжести представлены на рис. 9, а.

Жесткость портала составляет  $R_G = F_{G_{баб}} / u_{ZG} = 50000 / 171,3 = 291 \text{ Н/мкм}$  (где  $F_{G_{баб}} = 50000 \text{ Н}$  – сила тяжести бабки, а  $u_{ZG}$  – статическое вертикальное перемещение на конце шпинделя). В МКЭ-расчете портал во всех своих частях находится под действием силы тяжести, но деформационные перемещения (табл. 1) отнесены к весу суппорта. Так сделано потому, что вес большей части остальных деталей портала прямо передается на фундамент. Это вызывает сжатие, перемещения от которого обычно малы по величине. Податливость портала обуславливают главным образом изгибы и кручения деталей.

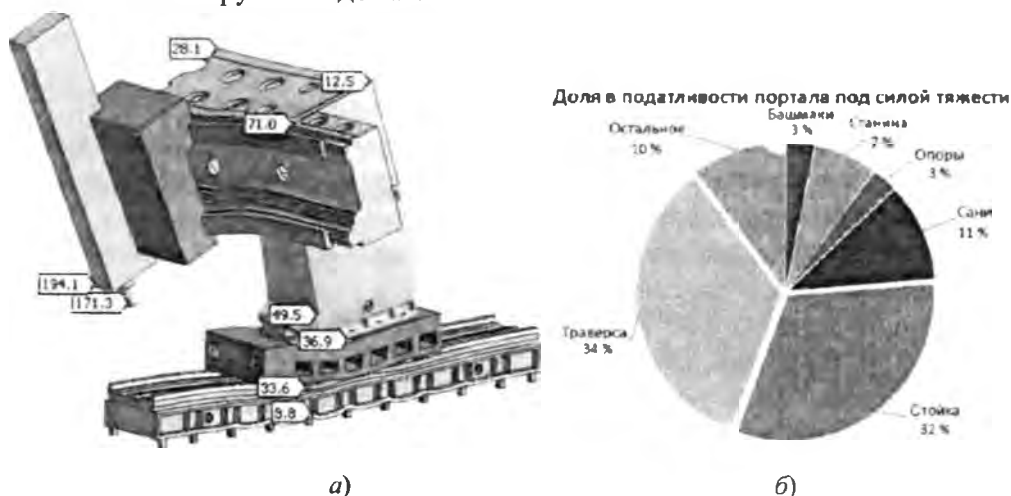


Рис. 9. Картина вертикальных статических перемещений портала при нагружении силой тяжести (а) и доли отдельных деталей в податливости портала (б)

Клевок бабки обеспечивают три деформационных движения:

1) кручение траверсы против часовой стрелки (иллюстрируется маркерами вертикального опускания 71,0 мкм и 12,5 мкм на рис. 9, а);

2) изгиб траверсы (опускание середины траверсы на 28,1 мкм, а конца – только на 12,5 мкм; прогиб  $\delta = 28,1 - 12,5 = 15,6 \text{ мкм}$ );

3) локальное складывание стенок в районе носка стойки (маркер 49,5 мкм), ведущее к проседанию всей передней стороны стойки.

Кручение и изгиб обуславливают существенную долю (34 %) траверсы в податливости портала (рис. 9, б). Благодаря складыванию стенок (податливость носка) доля стойки почти столь же велика (32 %).

Доля саней (11 %) связана с их прогибом под стойкой. Однако вряд ли это имеет прямое отношение к величине клевка бабки.

Анализ податливости деталей портала для всех 4-х случаев нагружения показывает, что всегда с большим отрывом лидируют траверса и стойка. Именно их нужно усиливать в первую очередь. Третьей по важности деталью являются сани.

Таблица 1

Влияние жесткости деталей портала на вертикальное перемещение  $u_{zG}$  и поворот  $\alpha_{xz}$  шпинделя при действии силы тяжести

Деталь	Коэффициент вариации $a_{вж}$	Модуль упругости $E$ , ГПа/жесткость $r_n$ , Н/мкм	Перемещение шпинделя $u_{zG}$ , мкм	Угол поворота ползуна $\alpha_{xz}$ , рад $10^{-6}$	Изменение $u_{zG}$ по сравнению с базой, %	Изменение $\alpha_{xz}$ по сравнению с базой, %
Базовый вариант	1	110 / 3000	171,3	81,162	—	—
Башмак	1/2	— / 1500	177,9	83,817	3,9 %	3,3 %
	2	— / 6000	169,3	79,170	-1,2 %	-2,5 %
Станина	1/2	55 / —	184,6	83,320	7,8 %	2,7 %
	2	220 / —	166,0	79,502	-3,1 %	-2,0 %
Опора	1/2	— / 1500	177,8	80,830	3,8 %	-0,4 %
	2	— / 6000	169,9	79,834	-0,8 %	-1,6 %
Сани	1/2	55 / —	190,7	88,797	11,3 %	9,4 %
	2	220 / —	162,3	76,846	-5,3 %	-5,3 %
Колонна	1/2	55 / —	225,0	108,216	31,3 %	33,3 %
	2	220 / —	143,5	67,552	-16,2 %	-16,8 %
Траверса	1/2	55 / —	227,2	115,021	32,6 %	41,7 %
	2	220 / —	141,0	63,402	-17,7 %	-21,9 %
Вставка (п/б) в сани		110+30(п/б) / —	156,8	73,859	-8,5 %	-9,0 %
Вставка (п/б) в стойку		110+30(п/б) / —	142,3	64,398	-16,9 %	-20,7 %
Вставки (п/б) в стойку и сани		110+30(п/б) / —	127,5	55,436	-25,6 %	-31,7 %
Вставка(п/б) в траверсу		110+30(п/б) / —	152,9	48,133	-10,7 %	-40,7 %
Вставки (п/б) в траверсу и колонну		110+30(п/б) / —	112,9	29,876	-34,1 %	-63,2 %
Вставки (п/б) в траверсу, колонну и сани		110+30(п/б) / —	94,9	23,568	-44,6 %	-71,0 %

Обратим также внимание на нижнюю полку станины (маркер 8,8 мкм). Она локально изгибается в районе каждого башмака. Полку следует усилить, но это даст

лишь меньшее на несколько микрометров равномерное проседание станины. Картина клевка не изменится. По сравнению с величиной клевка (171 мкм) эффект усиления станины будет невелик.

Резко снизить статическую деформацию портала способны полимербетонные вставки. Может показаться, что вставка утяжелит траверсу и увеличит ее прогиб. Однако МКЭ-расчет показывает, что прогиб практически неизменен и составляет  $\delta = 53,3 - 37,8 = 15,5$  мкм.

Следовательно, возросшая изгибная жесткость траверсы компенсирует ее утяжеление. Кроме того, возрастает крутильная жесткость. Одиночная вставка в траверсу снижает статическое опускание шпинделя (табл. 1) до 152,9 мкм (в 1,12 раз).

Одиночная вставка в стойку уменьшает перемещение шпинделя до 142,3 мкм (в 1,2 раза). Носок стойки заполняется полимербетоном и становится жестким.

Заливка полимербетона и в стойку, и в траверсу снижает  $u_{zG}$  до 112,9 мкм (в 1,52 раза). Существенно, что  $1,52 > 1,12 \cdot 1,2 = 1,34$ . Это эффект синергизма между стойкой и траверсой. Он еще будет обсужден ниже.

Вставки в траверсу, колонну и сани не позволяют шпинделю опуститься более чем на 94,9 мкм. Следовательно, эффект клевка уменьшается в 1,81 раза. Это можно считать достаточным.

#### Влияние полимербетонных вставок на жесткость портала

В зависимости от состава полимербетона его модуль упругости  $E_{пб}$  может изменяться в пределах 10–40 ГПа [4]. Влияние полимербетонных вставок на жесткость портала было оценено при нагружении станка собственным весом. Результат представлен в табл. 2.

Таблица 2

#### Влияние модуля упругости $E_{пб}$ полимербетонных вставок на вертикальное перемещение $u_z$ и поворот шпинделя $\alpha_{xz}$ под действием силы тяжести

Модуль упругости полимербетона $E_{пб}$ , ГПа	Перемещение конца шпинделя $u_z$ , мкм	Угол поворота ползуна $\alpha_{xz}$ рад $10^{-6}$	Изменение $u_z$ по сравнению с базой, %	Изменение $\alpha_{xz}$ по сравнению с базой, %	Жесткость портала $R$ , Н/мкм
0 (база)	171,3	81,162	–	–	291,9
5	149,5	45,477	–17,0 %	–44,0 %	334,4
10	127,2	36,349	–29,5 %	–55,2 %	393,1
20	106,2	28,050	–41,4 %	–65,4 %	470,8
30	94,9	23,568	–47,9 %	–71,0 %	526,9
50	82,3	18,755	–55,1 %	–76,9 %	607,5

Зависимость  $u_z = f(E_{пб})$  оказалась плавной. Следовательно, умеренные колебания упругих свойств полимербетона не являются критичными. При  $E_{пб} > 30$  ГПа наращивание модуля упругости во вставках дает небольшой эффект в жесткости портала. Уменьшение  $E_{пб}$  ниже 10 ГПа делает вставки малозаметными в несущей системе станка. Поэтому для практики рекомендуется обеспечить  $E_{пб} = 20\text{--}30$  ГПа.

Влияние полимербетонных вставок на жесткость портала подытожено в табл. 3. Заполнение полимербетоном только саней дает рост жесткости в 1,08 раза (в среднем по всем случаям нагружения). Вставка в стойку обеспечивает результат в 20 %. Заполнение траверсы наиболее эффективно – жесткость портала увеличивается в 1,48 раза.

Таблица 3

**Жесткость портала  $R$  для разных случаев нагружения в зависимости от применения полимербетонных вставок**

Деталь	Сила, действующая на портал, Н				Средняя жесткость $R$ , Н/мкм	Увеличение жесткости относительно базовой (раз)
	$F_z$	$F_x$	$F_y$	$G$		
База	384,6	515,2	293,3	291,9	371,2	1
Сани-вставка	419,5	554,0	316,5	318,9	402,2	1,08
Стойка-вставка	463,4	612,7	352,1	351,4	444,9	1,20
Траверса-вставка	581,1	877,2	411,5	327,0	549,2	1,48
Три вставки	895,3	1245,3	590,0	526,9	814,4	2,19

Можно было бы предположить, что вставки сразу во все три перечисленные детали повысят жесткость в  $1,08 \cdot 1,2 \cdot 1,48 = 1,92$  раза. В действительности жесткость поднимается в 2,2 раза. Это эффект **синергизма**, т. е. увеличение жесткости системы (портала) в результате взаимодействия между деталями-соседями. Усиление полимербетонной вставкой только одной детали отчасти гасится локальными деформациями в смежных податливых деталях. Возле стыков деформируются их тонкие, неподкрепленные стенки. Поэтому любой неподвижный стык деталей желательно подкрепить полимербетоном с обеих сторон.

Мнение о синергизме при одновременном заполнении полимербетоном всех деталей портала подтверждает табл. 3. Из нее следует, что эффекты от отдельных вставок невелики. Резкий скачок для всех случаев нагружения происходит при создании трех соседствующих вставок.

Следовательно, целесообразно заполнять полимербетоном сразу весь портал. Например, если залита траверса и на это потрачено 6396 кг материала, то заполнение стойки и саней потребует только 2851 кг. Жесткость же портала поднимется с 549 до 814 Н/мкм, а демпфирование колебаний полимербетоном будет обеспечено практически по всему станку. Затраты на вставки можно будет уменьшить оптимизацией их формы, например, не заполняя сердцевины траверсы и стойки.

Как видно из табл. 3, полимербетонные вставки не выравнивают жесткость портала по осям. Однако они обеспечивают очень хорошее демпфирование. Сочетание высокой статической жесткости (пусть и неравномерной) и сильного демпфирования должно положительно сказаться на динамическом качестве станка.

Сделанные оценки предполагают полное сцепление детали и ее вставки. Пробный МКЭ-расчет показал, что отслоившаяся вставка, контактирующая с отливкой через поверхности трения, дает весьма небольшой эффект по жесткости. Следовательно, сцепление детали и вставки должно быть технологически обеспечено и проконтролировано.

**Заключение**

1. Методами математического моделирования установлено, что основными деталями, обуславливающими на 2/3 податливость подвижного портала продольно-фрезерного станка типа «Гентри», являются траверса и стойка. В меньшей степени податливость зависит от саней (9 %). Распределение податливостей между деталями примерно одинаково для случаев нагружения портала тремя компонентами силы резания и силой тяжести.

2. Наименьшая жесткость на шпинделе отмечена в поперечном направлении ( $R_y = 293$  Н/мкм), наибольшая – в продольном направлении ( $R_x = 515$  Н/мкм). Жесткость в целом невелика, а ее изменение по направлению (до 75 %) существенно, что нежелательно для статического и динамического качества станка.

3. Траверса станка нуждается в увеличении крутильной жесткости. Стойке и саням необходим подъем изгибной жесткости в вертикальной продольной плоскости XZ.

4. Станина, опоры качения и фундаментные башмаки обладают достаточной жесткостью. Ее дальнейшее увеличение слабо сказывается на жесткости портала. При этом недопустимо уменьшение жесткости каждой отдельной опоры качения или башмака ниже 400 Н/мкм.

5. Снижение податливости портала достигается заполнением внутренних полостей деталей несущей системы станка полимербетоном. У любой базовой детали это поднимает жесткость не менее чем в 2 раза. Для полимербетона желателен модуль упругости не ниже 20–30 ГПа. Отслоение вставки от поверхности детали снижает эффект от ее применения практически до нуля.

6. Вставки из полимербетона эффективно снижают крутильную податливость траверсы и изгибную податливость стойки и саней. Вставки уменьшают статический прогиб станка от силы тяжести до 1,8 раз, несмотря даже на производимое ими утяжеление конструкции.

7. Важно использование вставок из полимербетона одновременно в трех основных деталях портала – в траверсе, стойке и санях. Эффект от заполнения полимербетоном только одной из них гораздо меньше: 48 % для траверсы, 20 % для колонны и 8 % для саней. Благодаря синергизму, являющемуся результатом взаимодействия между соседними базовыми деталями, жесткость портала во всех направлениях повышается в среднем до 2,2 раз.

### Литература

1. Шпур, Г. Справочник по технологии резания металлов : пер. с нем. В 2 кн. / Г. Шпур, Т. Штеферле. – М. : Машиностроение, 1985. – Кн. 1. – 616 с.
2. Кирайт, Ю. Н. Продукция УП «МЗОР» / Ю. Н. Кирайт // Машиностроение–2010: технологии – оборудование – инструмент – качество : материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 7–8 апр. 2010 г. – Минск : Бизнесофсет, 2010. – С. 91–92.
3. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация : пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. – М. : Мир, 1986. – 312 с.
4. Браиловский, М. И. Металлобетонные базовые конструкции металлорежущих станков / М. И. Браиловский, А. Г. Воскобойник, А. А. Воскобойник. – Коломна : Воентехиздат, 2010. – 76 с.
5. Козловский, Н. А. Жесткость и виброустойчивость тяжелых фрезерных станков / Н. А. Козловский, М. П. Зайкин. – Минск : Наука и техника, 1986. – 135 с.
6. Туромша, В. И. Исследование жесткости продольно-фрезерного станка с подвижным порталом с помощью конечно-элементного моделирования / С. С. Довнар, Туми эль-Мабрук Абузафер Али // Машиностроение : респ. межвед. сб. науч. тр. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2010. – Вып. 25. – С. 270–277.