

максимальных и минимальных возбуждений на макете, а также, что особенно важно, тенденций изменения фиксируемого динамического процесса при изменении инерционно-жесткостных характеристик путем установки различного количества пластин, имитирующих боевой модуль.

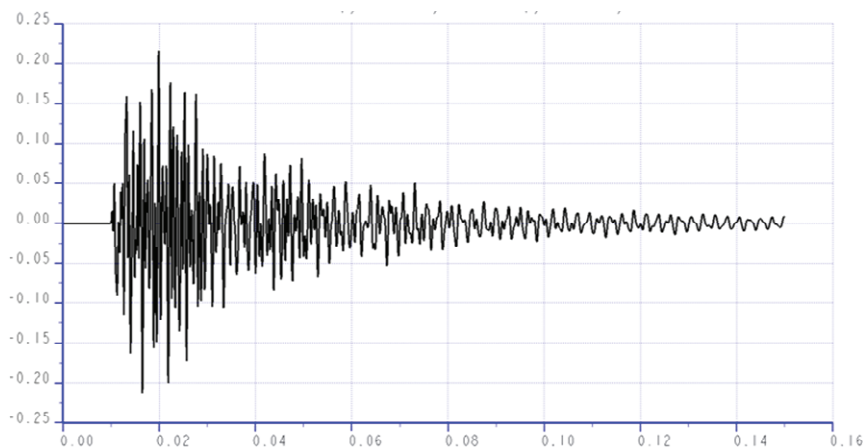


Рис. 10. Перемещения точки конструкции, полученные при решении задачи динамики в Pro/ENGINEER – Pro/Mechanica

Что касается численных оценок соответствия результатов конечно-элементных и экспериментальных исследований, то они представлены на рис. 9. Видно, что даже сравнительно экономная конечно-элементная модель, содержащая 111 Shell-элементов, позволяет промоделировать динамические характеристики макета с погрешностью, не большей 12 %.

**Выводы.** Анализ результатов исследований дает основание для следующих выводов.

1. Проведенный комплекс расчетно-экспериментальных исследований продемонстрировал работоспособность и эффективность предложенного авторами подхода к расчетно-экспериментальному обоснованию параметров конечно-элементных моделей для исследования реакции бронекорпусов легкой категории по массе на различные виды воздействий.

2. В ходе исследований макета части бронекорпуса БТР-80 установлено удовлетворительное качественное и количественное соответствие результатов численных и экспериментальных исследований. Погрешность оценивается в 12 %.

3. Полученные результаты позволяют использовать конечно-элементную модель с аналогичными размерами для моделирования процессов в реальной конструкции корпуса БТР-80.

В качестве направлений дальнейших исследований планируется применение созданных моделей и разработанных подходов для исследования физико-механических процессов и состояний с целью обоснования рациональной

структуры и параметров конструкций бронекорпусов проектируемых легкобронированных машин.

**Литература:** 1. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с. 2. *Ткачук Н.А.* Параметрические модели элементов сложных систем как основа построения специализированных расчетных схем / Н.А. Ткачук, Ю.В. Веретельник, Ю.Я. Миргородский, Е.В. Пелешко // *Механіка та машинобудування*. – Харків: НТУ «ХПИ», 2004. – № 2, т. 2. – С.79-84. 3. *Ткачук Н.А.* Решение задач расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем / Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, Э.В. Глушенко, А.В. Ткачук // *Механіка та машинобудування*. – Харків: НТУ «ХПИ», 2004. – № 2, т. 2. – С.85-96. 4. *Ткачук Н.А.* Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, А.Д. Чепурной [и др.] // *Механіка та машинобудування*. – Харків: НТУ «ХПИ», 2006. – №1. – С. 57-79. 5. *Комплексне дослідження міцності та жорсткості корпусів транспортних засобів спеціального призначення* / Є.В. Пелешко, М.А. Ткачук, С.Т. Бруль, О.В. Литвиненко, І.М. Карпейчик // *Вестник НТУ «ХПИ»*. Тем. вип.: Транспортное машиностроение. – 2010. – № 39. – С. 116-131. 6. *Основы обобщенного параметрического описания сложных механических систем* / Н.А. Ткачук, А.Д. Чепурной, Г.Д. Гриценко и др. // *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*, 2007, №9(115), част. 1. – С.196-205. 7. *Экспериментальные исследования динамических процессов в макетах бронекорпусов транспортных средств специального назначения* / Г.Д. Гриценко, Н.А. Ткачук, Е.В. Пелешко, А.В. Литвиненко // *Вісник НТУ «ХПИ»*. Тем. вип.: *Машинознавство та САПР*. – Харків: НТУ «ХПИ», 2009. – №28. – С.16-19.

Поступила в редколлегию 21.05.11

УДК 621.01

**Т.В. ПОЛИЩУК**, зам. генерального директора,  
ОАО „Азовобщешаш”, г. Мариуполь,  
**Н.А. ТКАЧУК**, докт. техн. наук, проф., зав. каф. ТММ и САПР НТУ „ХПИ”,  
**Н.Б. НЕГРОБОВА**, студентка гр. ТМ-85Б, НТУ „ХПИ”,  
**В.И. ГОЛОВЧЕНКО**, канд. техн. наук, нач. расчетного бюро,  
Головной специализированный конструкторско-технологический институт, г. Мариуполь

### КИНЕМАТИКА МЕХАНИЗМОВ НАКЛОНА КРУПНОГАБАРИТНЫХ МАШИН: КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Запропонована удосконалена методика розрахунково-експериментальних досліджень кінематики на прикладі механізму нахилу дугової сталеплавильної печі. Наведені результати комп'ютерного моделювання та експериментальних вимірювань.

Предложена усовершенствованная методика расчетно-экспериментальных исследований кинематики на примере механизма наклона дуговой сталеплавильной печи. Приведены результаты компьютерного моделирования и экспериментальных измерений.

The improved method is offered for computational and experimental researches of kinematics on the example of inclination mechanism of arc steel-smelting stove. The results of computer modeling and experimental measuring are presented.

**Введение.** При проектировании механизма наклона плавильной печи (МНПП) [1-10] возникает актуальная и важная задача разработки методики его исследования с целью обоснования конструктивных схем и параметров. Это относится к моделированию кинематики, анализу внутренних сил и реакций, а также определению напряженно-деформированного состояния (НДС) с учетом контактного взаимодействия. Первичным, исходным видом анализа в этой цепочке является кинематический анализ. Он составляет основное содержание данной работы.

Основными компонентами решаемой задачи являются:

1. Разработка адекватных моделей для анализа рабочего процесса наклона плавильной печи при сливе шлака и металла.
2. Разработка программно-модельного комплекса, реализующего математические и численные модели в виде специализированного программного обеспечения для многовариантных исследований процессов, протекающих при эксплуатации МНПП.
3. Обоснование параметров численных моделей кинематики МНПП по результатам экспериментальных исследований.
4. Разработка рекомендаций по выбору конструктивных схем и параметров на примере проектирования МНПП для оснащения конкретной дуговой сталеплавильной печи.

В работе описаны результаты решения описанного комплекса задач и исследований, являющихся составной частью работ по проектированию и изготовлению сталеплавильной печи для уникального производства литья в ОАО „Азовмаш” в части исследования перемещений точек механизма.

**1. Методика исследования движения механизма наклона плавильной печи.** При разработке математической модели для кинематического анализа механизма наклона плавильной печи необходимо учитывать следующие обстоятельства:

- 1) кинематический анализ является не изолированным видом расчета, а встраиваемым в последовательность взаимосвязанных задач силового анализа, расчета НДС с учетом контактного взаимодействия по опорным поверхностям, а также предшествующего геометрического моделирования и последующего цикла синтеза;
- 2) проводимые исследования должны обеспечивать точность, подтверждаемую параллельными расчетами на различных моделях;
- 3) в силу ответственности создаваемой конструкции требуется дополнительное подтверждение результатов, получаемых с применением аналитических и численных моделей, в ходе экспериментальных исследований.

Таким образом, основной решаемой проблемой при проведении кинематического анализа является не разработка какого-то нового подхода к решению возникающей задачи (так как она достаточно тривиальна), а полу-

чение избыточных данных из различных источников с целью обеспечения достоверности получаемых результатов и конструктивных решений. Кроме того, предлагается интеграция создаваемых моделей в реальный процесс проектирования механизма наклона.

Рассмотрим, следуя [1-10], общие подходы к кинематическому, силовому анализу и моделированию напряженно-деформированного состояния и контактного взаимодействия механизмов наклона крупногабаритных емкостей со следящей нагрузкой и подвижным опиранием в процессе их синтеза

При проектировании механизмов наклона емкостей технологических машин (МНЕТМ) [1, 2, 7] возникает многокритериальная задача обоснования структуры самого механизма, его основных параметров, а также конструктивных схем и параметров силовых элементов его металлоконструкции. Рассмотрим в качестве типового механизм наклона плавильной печи, предназначенный для функционирования в составе сложного технического автоматизированного комплекса, например, линии непрерывного литья и проката заготовок.

Сам характер работы линии формирует особые требования как к техническим характеристикам печи, так и к надежности ее работы, к долговечности и ресурсу наиболее нагруженных и ответственных элементов конструкции. Условия многофункционального сопряжения печи с другими элементами линии формируют определенные требования в виде выполнения некоторых равенств, сформированных относительно характеристик состояния (в основном – кинематические характеристики, определяющие углы слива шлака и металла, величину хода штока силового цилиндра механизма наклона плавильной печи, длину катания опорных сегментов печи и т.д.). Требования по массе выплавленной стали порождают условия относительно предельных силовых факторов в сопряжениях элементов печи (усилия в шарнирах от совместного воздействия веса металлоконструкции печи, теплозащиты и расплавленного металла, по-разному распределенные в разные моменты циклограммы работы печи). Механические характеристики материалов создают множество ограничений на величины допускаемых напряжений в металлоконструкции механизма наклона дуговой сталеплавильной печи (МНДСП) и контактных давлений в сопряжениях цилиндрических опорных поверхностей (перекатывающихся сегментных цилиндрических опор) с плоскими опорными поверхностями (фундаментными балками). Соответственно, естественное требование минимальной металлоемкости и стоимости печи трансформируется в задачу минимизации массы или стоимости изготовления металлоконструкции механизма наклона печи.

Все указанные критерии и ограничения записываются совместно с операторным представлением физико-механических процессов и состояний. При этом учитывается то или иное число факторов, определяющее, в основном, подходы к решению поставленных задач. Отмеченные особенности задачи оптимального проектирования МНДСП формируют достаточно сложную проблему формализации всех критериев, ограничений, моделей, методов и алгоритмов. Они в совокупности составляют теоретическую основу решения актуальной и важной задачи обоснования проектных параметров и конструктивных

схем МНЕТМ. Разработка общих подходов к решению этой задачи описана ниже на примере механизма наклона дуговой сталеплавильной печи.

При решении такой сложной задачи как оптимальный синтез механизмов наклона емкостей технологических машин с учетом большого комплекса критериев, ограничений, факторов и процессов необходимо привлекать общие системные подходы [11]. В то же время эти подходы в данном случае недостаточно применить только к анализу и синтезу самой конструкции. Предлагается в расширение традиционного системного подхода рассмотреть с этих позиций все компоненты решаемой задачи: пространство кинематических схем механизма  $K$ ; систему нагрузок в сопряжениях элементов механизма наклона плавильной печи  $Q$ ; пространство конструктивных схем  $S$  и обобщенных параметров  $P$ ; множество перемещений элементов механизма наклона как твердого тела  $W$  и упругих перемещений элементов конструкции  $U$ ; массив внешних нагрузок  $f$ ; множество технических характеристик  $T$  и характеристик состояния  $H$ ; множество критериев  $I$  и ограничений  $G$ ; совокупность операторов  $L$ , описывающих физико-механические процессы, протекающие в ходе эксплуатации.

Ставится задача определения таких оптимальных значений  $K^*, S^*, P^*$ , которые удовлетворяют следующим соотношениям:

$$I(K^*, S^*, P^*) \rightarrow \min; \quad (1) \quad G(H) \geq 0; \quad (2)$$

$$T \geq \tilde{T}; \quad (3) \quad L(U, W, S, P, f, t) = 0. \quad (4)$$

Здесь  $\tilde{T}$  – заданные техническим заданием нижние уровни технических характеристик;  $t$  – время.

Формально соотношения (1)–(4) представляет собой задачу нелинейного программирования [12, 13], для решения которой в общем виде для произвольной структуры  $I, H, L$  не существует универсальных методов решения. Однако в данном конкретном случае, применяя расширенный системный подход, задачу можно разбить на частные подзадачи и подсистемы, связанные общим подходом к решению глобальной задачи для всей системы. Предлагается несколько срезов, в которых можно рассматривать задачу (1)–(4) [1–10].

Один из них – *срез процессов и состояний*. Рассматриваемый объект с точки зрения описания физико-механических процессов допускает разделение на следующие процессы и состояния:

$$L_1(W, S, K, P, t) = 0; \quad (5) \quad L_2(Q, W, S, K, P, f) = 0; \quad (6)$$

$$L_3(U, W, Q, S, P, f) = 0. \quad (7)$$

В результате вместо единого оператора  $L$  можно рассматривать совокупность операторов:  $L_1$  описывает кинематику механизма при заданной его структуре  $S$  и обобщенных параметрах  $P$ ; оператор силового анализа  $L_2$  описывает

уравнения статического равновесия системы в различные моменты, соответствующие различным  $W$  [14]; и оператор НДС  $L_3$  описывает распределение упругих перемещений  $U$  и напряжений  $\sigma(U)$  в элементах металлоконструкций [15]. Здесь в уравнениях (5)–(7)  $S, P, f$  считаются заданными. В (5)  $W$  является искомым, а в (6), (7) – параметром. В (6) искомым является распределение усилий  $Q$ , а в (7) они служат параметром. Также в (7) искомыми выступают распределения упругих перемещений элементов исследуемой конструкции.

В данном случае, как отмечалось выше, интерес, в первую очередь, представляет моделирование кинематики (5). С акцентом на кинематический анализ в настоящее время одной из наиболее актуальных задач машиноведения является разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения для анализа кинематики, силового и прочностного расчетов элементов механизмов, звенья которых находятся в условиях взаимного сопряжения (обкатывания, скольжения) по рабочим поверхностям сложной формы [16–19]. На первых этапах проектирования машин, в состав которых входят данные механизмы, в процессе оптимизации в качестве искомым могут выступать параметры звеньев механизмов, в т.ч. форма и размеры рабочих поверхностей сопряжения.

В результате, собственно кинематический и силовой анализ проектируемого механизма оказывается интегрированным во внутренний цикл итерационных процедур синтеза структуры и оптимизации параметров, что определяет необходимость такой организации решения этих задач, которая была бы естественным образом приспособлена к многовариантным исследованиям с варьированием основных параметров механизма [20, 21]. При этом сами задачи анализа кинематики, силового и прочностного расчетов для данных механизмов являются нетривиальными в силу их специфических особенностей и, в частности, наличия подвижного контакта рабочих поверхностей. Таким образом, исходная задача приводится к задаче создания легко алгоритмизируемой методики исследования кинематики, силового анализа и определения НДС. Ее структуре должен быть придан блочно-модульный вид таким образом, что на входе-выходе каждого из модулей задаются или определяются те или иные параметры и характеристики механизма. При этом на одном из первых этапов исследования необходимо решать задачу кинематического и силового расчета. Результаты решения такой

задачи для одного варианта механизма наклона плавильной печи, разработанной в ОАО „ГСКТИ” для ЗАО „АзовЭлектроСталь”, представлены здесь на примере нескольких вариантов кинематической схемы.

Рассмотрим один из вариантов МНДСП (вариант I), приведенный на рис. 1. Наклоняемая платформа представляет собой сварную конструкцию, на которую устанавливается печь 2, опирающаяся на коромысло 3 с цилиндрическим профилем, перекатывающееся по

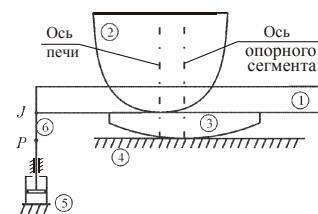


Рис. 1. Схема механизма наклона дуговой сталеплавильной печи (вариант I)

основанию 4. Наклон платформы и вместе с ней плавильной печи производится гидроцилиндром 5, усилие от которого передается на раму посредством штока и рычага 6. Требуется установить зависимость между величиной угла наклона плавильной печи и ходом штока гидроцилиндра (перемещение поршня), а также определить усилия в элементах конструкции при различных значениях угла наклона платформы. Эту задачу можно решить, представив соединенные между собой платформу и печь одним абсолютно жестким телом. При малых скоростях движения поршня инерцией жидкости можно пренебречь, равно как и инерционными составляющими усилий, а потому искомые силы находятся из условий статического равновесия конструкции в различных ее положениях.

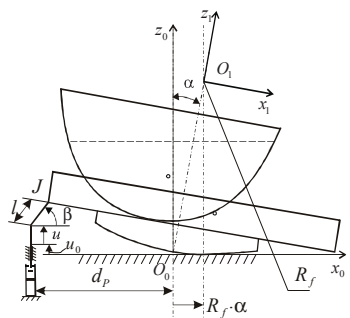


Рис. 2. Положение звеньев механизма при наклоне

Движение платформы определяется ходом штока гидроцилиндра, а также характером перекачивания сегмента по основанию. Первоначально предполагается, что это качение происходит без проскальзывания. В этом случае система „гидроцилиндр – наклоняемая платформа” обладает только одной степенью свободы. Ее положение определяется одним из взаимосвязанных параметров:  $u$  – перемещением штока гидроцилиндра или  $\alpha$  – углом наклона платформы (рис. 2).

Для определения зависимости между  $u$  и  $\alpha$ , а также положения элементов конструкции при различных их значениях, рассмотрим, помимо глобальной неподвижной, систему координат  $O_0x_0z_0$ , ось  $O_0z_0$  которой пересекает мгновенную ось вращения сегмента в исходном вертикальном положении плавильной печи (см. рис. 2), и локальную систему  $O_1x_1z_1$ , жестко связанную с платформой. Ее центр  $O_1$  совпадает с центром кривизны цилиндрического профиля сегмента. Для удобства будем рассматривать однородные координаты точек в этих системах координат, связанные преобразованием

$$r^0 = [x^0 \ z^0 \ 1]^T = M_{01} r^1 = M_{01} [x^1 \ z^1 \ 1]^T, \quad (8)$$

$$\text{где } M_{01} = M_{\text{shift}}(R_f \alpha) \cdot M_{\text{rot}}(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & R_f \cdot \alpha \\ 0 & 1 & R_f \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

матрица преобразования координат. Здесь  $M_{\text{shift}}$  отвечает перемещению центра кривизны сегмента  $O_1$  на величину  $R_f \cdot \alpha$ , а  $M_{\text{rot}}$  – повороту платформы на угол  $\alpha$ .

В этих обозначениях легко найти траекторию точки шарнира  $J$ , которая в локальной системе  $O_1x_1z_1$  имеет постоянные координаты

$$r_J^1 = [x_J^1 \ z_J^1 \ 1]^T. \quad (9)$$

Отсюда

$$r_J^0(\alpha) = M_{01}(\alpha) \cdot r_J^1 = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cdot x_J^1 + \sin \alpha \cdot z_J^1 + R_f \cdot \alpha \\ -\sin \alpha \cdot x_J^1 + \cos \alpha \cdot z_J^1 + R_f \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_J^0(\alpha) \\ z_J^0(\alpha) \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Зная положение шарнира  $J$  и длину рычага  $l$ , легко найти величину хода поршня, отвечающую заданному значению угла наклона плавильной печи:

$$u + u_0 = z_J^0(\alpha) - \sqrt{l^2 - (d_p + x_J^0(\alpha))^2}. \quad (11)$$

Вместе с ней определяется угол наклона рычага  $\cos \beta = [d_p + x_J^0(\alpha)]/l$ .

На рис. 3 представлены траектории центров тяжести плавильной печи с наклоняемой платформой ( $m_f$ ), расплава ( $m_l$ ) и всей конструкции ( $M$ ) при изменении угла наклона  $\alpha$ .

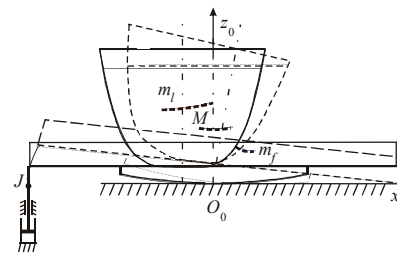


Рис. 3. Траектории центров тяжести плавильной печи с наклоняемой платформой ( $m_f$ ), расплава ( $m_l$ ) и всей конструкции ( $M$ )

Рассмотрим вариант II механизма наклона дуговой сталеплавильной печи. Основным назначением исследуемой конструкции, как и рассмотренной ранее, является осуществление наклона печи при выполнении двух производственных операций: слива шлака и готовой расплавленной стали.

Уравнения движения платформы механизма наклона в этом случае строятся аналогично варианту I. Как и выше, следуя [16], помимо глобальной неподвижной системы координат  $O_0x_0z_0$ , ось  $O_0z_0$  которой пересекает

мгновенную ось вращения сегмента в исходном вертикальном положении плавильной печи (рис. 4), вводим локальную систему  $O_1x_1z_1$ , жестко связанную с платформой. Ее центр  $O_1$  совпадает с центром кривизны цилиндрического профиля сегмента (см. рис. 4). Для удобства будем рассматривать однородные координаты точек в этих системах координат, определяемые выражением (8). Аналогично (9), (10) находим координаты шарнира  $r_J^0(\alpha)$ .

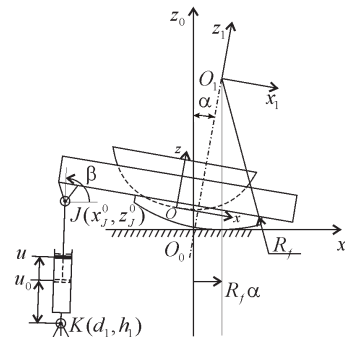


Рис. 4. Положение звеньев механизма (вариант II) при наклоне

Зная положение шарнира  $J$ , легко найти величину хода штока цилиндра, от-

вечающую заданному значению угла наклона плавильной печи:

$$u + u_0 = \sqrt{(x_j^0 - d_1)^2 + (z_j^0 - h_1)^2}. \quad (12)$$

Вместе с ней определяется угол наклона гидроцилиндра

$$\cos \beta = \frac{x_j^0 - d_1}{\sqrt{(x_j^0 - d_1)^2 + (z_j^0 - h_1)^2}}. \quad (13)$$

Диаграмма зависимости величины хода поршня гидроцилиндра для данного варианта конструкции от требуемого угла наклона печи приведена на рис. 5.

**2. Численные модели.** Для механизмов наклона крупногабаритных емкостей со следящей нагрузкой и подвижным опиранием характерной особенностью кинематического и силового их анализа является связанность задач, обусловленная наличием следящей нагрузки от расплава металла. Таким образом, нагрузка (в данном случае – положение центра масс расплава) является сложной функцией кинематических параметров (угла наклона платформы или хода штока поршня силового гидроцилиндра). Кроме того, само положение области контактного опирания сегментов на фундаментные балки является функцией этих кинематических параметров. Это вынуждает при проведении анализа кинематики, которая в рассматриваемом случае не является сложной, особое внимание уделять точности и достоверности расчетов и моделей.

В сочетании с требованием концепции обеспечения взаимного обмена информацией между всеми подсистемами создаваемого специализированного программно-модельного комплекса (СПМК) приходим к необходимости использования нескольких систем программирования для решения отдельных задач. Это позволяет не только повысить достоверность численных исследований за счет дублирования части моделей, но и обеспечить полнофункциональность этих моделей, поскольку различные программные средства обладают различными инструментами моделирования – от интерфейса и решателей до пре- и постпроцессинга.

*Модели для исследования кинематики механизма наклона дуговой сталеплавильной печи.* Для исследования кинематики МНДСП создаются несколько моделей: аналитическая модель, построенная методом кинематических диаграмм, создана в среде Maple (см. рис. 5); кинематическая модель – в среде CosmosMotion (рис. 6); кинематическая модель – в среде ADAMS (рис. 7).

В созданных моделях реализуется шарнирное закрепление гидроцилиндра к опорной поверхности и к платформе механизма наклона дуговой сталеплавиль-

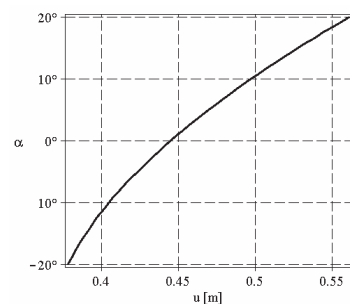


Рис. 5. Зависимости угла наклона макета МНДСП от величины хода поршня приводного гидроцилиндра, полученные аналитически

ной печи (см. рис. 6). Задается условие перекатывания или контактного сопряжения цилиндрической опорной поверхности (ЦОП) сегмента с основанием. Изменяемым является расстояние между шарнирами гидроцилиндра. Отслеживается при этом характер движения каждой точки конструкции, а также угол наклона платформы к горизонту  $\alpha$  (см. рис. 6). В частности, на рис. 8 приведены зависимости угла наклона  $\alpha(u)$ , где  $u$  – ход штока гидроцилиндра. Видно, что зависимости носят непрерывный плавный монотонный характер. Знание этих зависимостей позволяет в любом текущем положении определять взаимное положение гидроцилиндра, механизма наклона дуговой сталеплавильной печи и точек контакта ЦОП с фундаментными балками. Кроме того, траектории движения отдельных точек используются в дальнейшем для сравнения с экспериментальными данными.

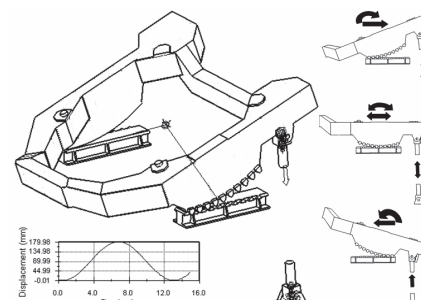


Рис. 6. Модель для исследования кинематики в среде CosmosMotion



Рис. 7. Модель для исследования кинематики в среде ADAMS

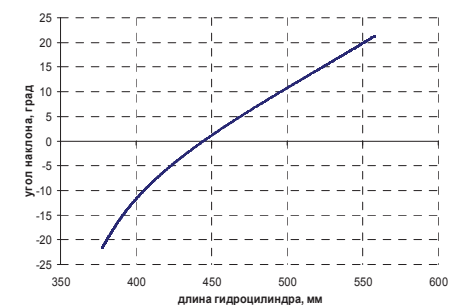


Рис. 8. Зависимости угла наклона макета МНДСП от величины хода поршня приводного гидроцилиндра, полученные в среде CosmosMotion

Эти данные передаются на этап силового расчета. Разработанный специализированный программно-модельный комплекс для анализа и синтеза элементов механизмов наклона крупногабаритных емкостей технологических машин со следящей нагрузкой и подвижным контактным опиранием является инструментальной реализацией предложенного общего подхода и

комплекса математических моделей [1-10]. При этом он обладает следующими особенностями.

1. Комплекс состоит как из отдельных программно-модельных модулей, работающих самостоятельно, так и из интегрируемых, сопряженных с универсальными мощными CAD/CAM/CAE-системами. Такой подход позволяет широко реализовывать параметрический подход к анализу и синтезу исследуемых механизмов.

2. Комплекс состоит из набора моделей и программных модулей, частично дублирующих и перекрывающих друг друга по области исследования и имеющим возможность моделирования. Это дает исследователю, кроме дополнительного подтверждения точности и адекватности моделей и результатов, также и широкие возможности обработки результатов и углубления инструментов анализа и синтеза.

3. Комплекс построен по принципу передачи данных между модулями, начиная с кинематического анализа – к силовому – далее к анализу напряженно-деформированного состояния с учетом контактного взаимодействия. На любом этапе присутствуют модули геометрического моделирования. Кроме того, на любом из этапов есть возможность корректировки любых обобщенных параметров и переход либо к началу работы текущего модуля, либо на любое число шагов назад. Таким образом, реализуется сквозная параметричность и ассоциативность исследований.

4. Предложенный специализированный программно-модельный комплекс (СПМК) программных модулей и численных моделей нацелен на расчетно-экспериментальное уточнение параметров по результатам экспериментальных исследований, что является качественно новым и ценным его свойством.

5. Несмотря на достаточно широкий набор используемых программных средств (SolidWorks, Pro/ENGINEER, Maple, ANSYS, ADAMS), созданный СПМК может интегрироваться и в другие программные пакеты. Это является достаточно ценным качеством, т.к. позволяет на разных предприятиях, в КБ, НИИ и университетах использовать те программные средства, которые используются у них, без снижения возможностей моделирования.

С использованием разработанного специализированного программно-модельного комплекса можно проводить весь комплекс расчетов механизмов наклона технологических машин со следящей нагрузкой и подвижным контактным опиранием. В частности, ниже представлены результаты кинематического анализа.

**3. Численные исследования.** Разработанный комплекс математических и численных моделей механизмов наклона крупногабаритных емкостей технологических машин со следящей нагрузкой и подвижным контактным опиранием и созданный на его основе специализированный программно-модельный комплекс позволяют проводить обширное множество исследований разнообразных механизмов. В ходе проектирования запланированы и проведены следующие исследования, ориентированные на реше-

ние таких прикладных задач, которые возникли при проектировании механизма наклона уникальной дуговой сталеплавильной печи емкостью 60 тонн для ЗАО „АзовЭлектроСталь”: анализ кинематики и силовой расчет механизма наклона дуговой сталеплавильной печи; анализ напряженно-деформированного состояния металлоконструкции МНДСП с учетом контакта опорных сегментов с основанием; синтез структуры механизмов наклона технологических машин на основе комплексного анализа и рекомендаций по выбору конструктивных параметров; анализ напряженно-деформированного состояния основных элементов оптимизированной конструкции механизма наклона плавильной печи.

Таким образом, переходя от исследования кинематики, через решение задач статики и определения напряженно-деформированного состояния макета механизма наклона дуговой сталеплавильной печи и разрабатывая на этой основе рекомендации по выбору конструктивных схем и параметров механизма, в завершение исследований эти рекомендации проверяются на реальной конструкции, спроектированной на основании этих рекомендаций. Ниже описан блок кинематического анализа механизма наклона дуговой сталеплавильной печи.

Созданная модель макета МНДСП интегрирована в программный комплекс CosmosMotion. Это позволило промоделировать траектории отдельных точек макета (теоретически – эпициклоиды) (рис. 9), сам характер движения всей конструкции (рис. 9-15), а также получить зависимости между ходом штока гидроцилиндра и углом наклона платформы (см. рис. 8).



Рис. 9. Геометрическая модель макета МНДСП со связями, остроенными в CosmosMotion, и траекториями точек (1-4), полученными в результате исследования

Сравнение полученных результатов с данными аналитических вычислений (см. выше) демонстрирует не только их полное качественное совпадение, но и практически полную идентичность количественных данных. Этот этап является не излишним, поскольку построенные в системах CosmosMotion и ADAMS компьютерные модели в дальнейшем используются для вычисления следящей нагрузки от расплава как функции его кинематических параметров. При этом вычисления могут осуществляться в автоматизированном режиме, поэтому необходимо было проверить работоспо-

способность, адекватность и точность работы модуля анализа кинематики.

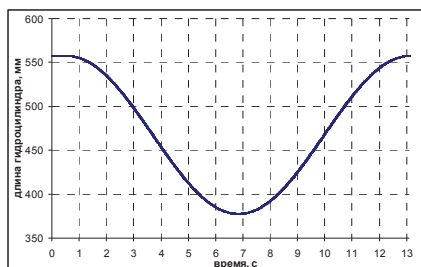


Рис. 10. Изменение длины гидроцилиндра в зависимости от времени (задаваемое)

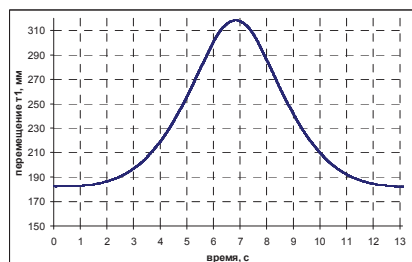


Рис. 11. Суммарные перемещения точки T1 во времени

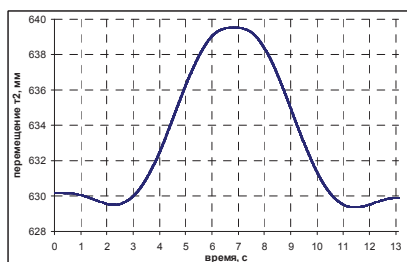


Рис. 12. Суммарные перемещения точки T2 во времени

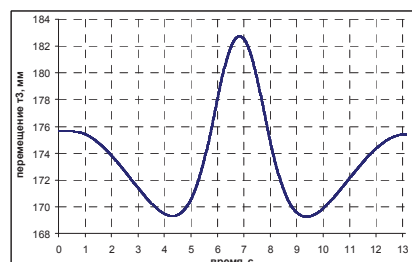


Рис. 13. Суммарные перемещения точки T3 во времени

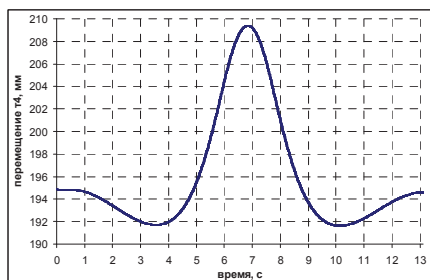


Рис. 14. Суммарные перемещения точки T4 во времени

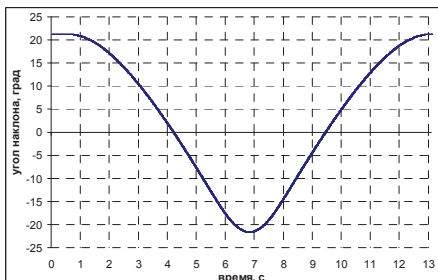


Рис. 15. Зависимость угла наклона МНДСП от времени

При решении задачи проектирования того или иного механизма на различных этапах возникают различные ситуации с решением той или иной задачи выбора или обоснования решений или параметров. Рассмотрим ситуацию на примере отдельных этапов обоснования проектных решений механизма наклона дуговой сталеплавильной печи, в частности, анализа его кинематики.

При решении задачи синтеза кинематической структуры  $K$  проектируемо-

го механизма пришлось привлекать не только результаты кинематического анализа, но и соображения общей компоновки механизма с дуговой сталеплавильной печью в составе проектируемой линии непрерывного литья. В связи с этим была выбрана схема механизма с наклоняемой платформой. Как следует из результатов анализа кинематики, проведенного с использованием различных программных средств и оригинальных программных модулей, реализующих предложенные в работе математические модели, сам характер изменения угла наклона платформы механизма от хода гидроцилиндра достаточно плавен и монотонен. Таким образом, приходим к ситуации, когда принятая на основе анализа конструктивных схем аналогичных машин и эксплуатационно-компоновочных соображений кинематическая схема оказывается достаточно удачной. В результате отпадает необходимость в прямом решении задачи синтеза по кинематическому критерию.

**5. Экспериментальные исследования.** Приведенные и описанные выше численные исследования относились не к полноразмерной модели механизма наклона дуговой сталеплавильной печи, а к его макету. Это обусловлено тем, что на этапе проектирования в руках исследователя, как правило, могут быть только конструкции-аналоги, а при их отсутствии – физические макеты. Поэтому был предложен и реализован вариант расчетно-экспериментального исследования, базирующегося на применении полнофункционального макета. В данном случае был изготовлен макет механизма наклона, с помощью которого был проведен цикл экспериментальных исследований (рис. 16-19). Он включал в себя этапы моделирования кинематики, статики, исследования напряженно-деформированного состояния и контактных давлений.



Рис. 16. Имитатор следящего нагружения механизма на макете

Моделирование следящего нагружения производилось путем закручивания силового винта устройства-имитатора (см. рис. 16). Управляемый наклон моделировался специальным винтовым талрепом, установленным на месте гидроцилиндра привода (см. рис. 17). Контроль перемещения опорного сегмента осуществлялся при помощи линейки, наклеенной вдоль опор, имитирующих фундаментные балки (см. рис. 18). Макет установлен на раме большой жесткости (см. рис. 19).

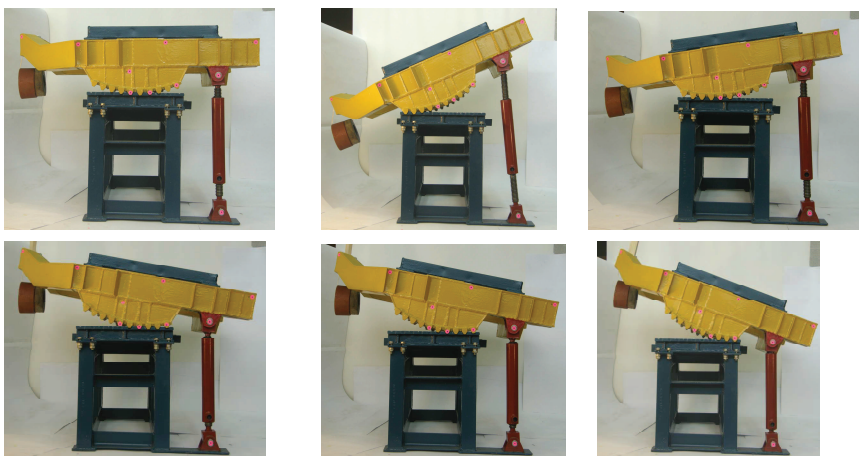


Рис. 17. Имитатор силового привода (гидроцилиндра) – талреп на макете

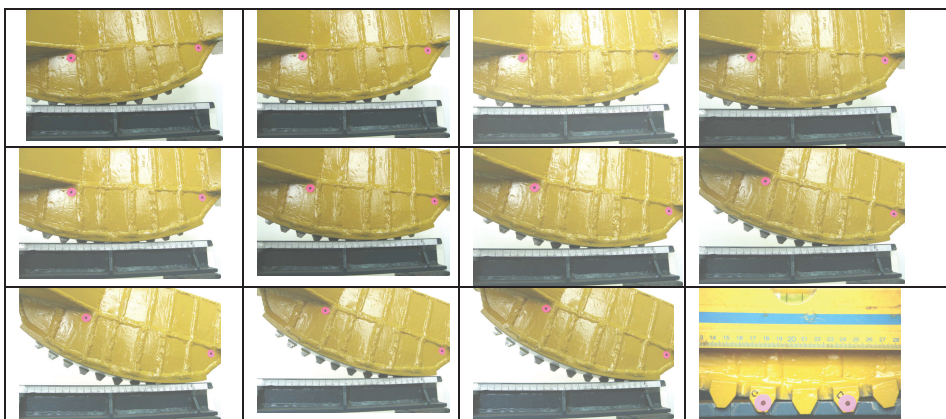


Рис. 18. Измерение положения опорного сегмента при наклоне платформы макета

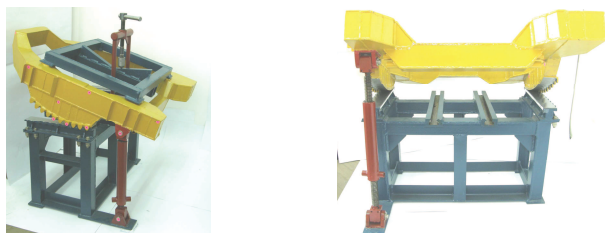


Рис. 19. Общий вид макета механизма наклона дуговой сталеплавильной печи

Экспериментальные исследования изготовленного макета механизма наклона дуговой сталеплавильной печи проводились в три этапа.

На первом этапе проводились экспериментальные исследования кинематики механизма. На рис. 20 и 21 и представлены схема измерений положений точек макета в процессе его движения, а также физическая модель с точками контроля в различных характерных положениях.

В некоторых точках устанавливались лазеры, а их след фиксировался на экране (рис. 22).

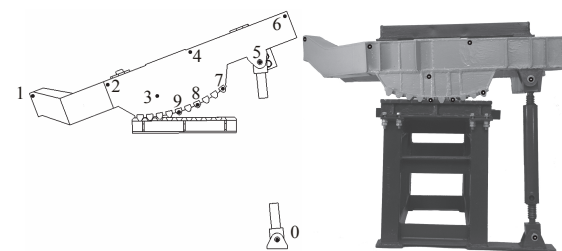


Рис. 20. Схема положения точек на макете МНДСП, в которых производились измерения перемещений

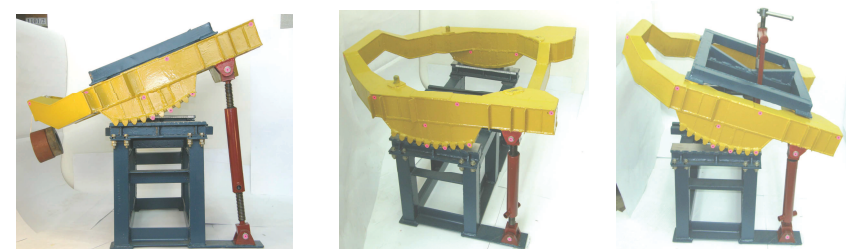


Рис. 21. Размещение контрольных точек макета механизма наклона в характерных положениях

Осуществлялась фотосъемка макета МНДСП в процессе наклона платформы при изменении длины талрепа, моделирующего силовой гидроцилиндр. Дополнительно с большой выдержкой фиксировалась траектория движения лазерных следов от контрольных точек на экране. Кроме того, проводилась (с одной фиксированной установки фотокамеры) фотосъемка для фиксации и текущего положения платформы, и некоторых контрольных точек на ней (см. рис. 22). Полученный набор кадров и траекторий является базой для сравнения с результатами численного моделирования кинематики макета механизма.

Полученные положения, траектории контрольных точек представлены на рис. 23 (там же приведены результаты численных расчетов). Как видно, получено полное качественное совпадение численных и экспериментальных



результатов, а также удовлетворительное количественное (погрешность – 2-4 %). Это свидетельствует, во-первых, об адекватности созданных численных моделей макета МНДСП для кинематического анализа и точности результатов, получаемых с помощью этих моделей. Этот факт обосновывает возможность применения разработанных моделей для исследования кинематики реальной конструкции механизма наклона дуговой сталеплавильной печи.

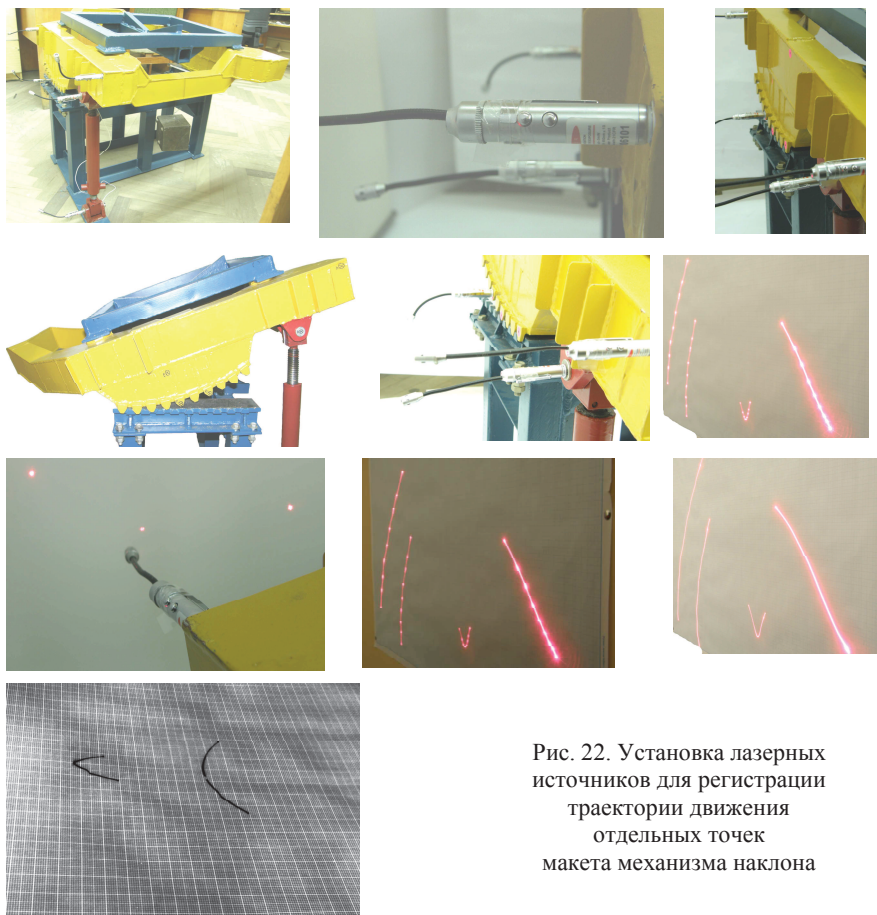


Рис. 22. Установка лазерных источников для регистрации траектории движения отдельных точек макета механизма наклона

Кроме того, поскольку данные кинематического анализа являются исходными данными для проведения остальных видов анализа, то можно констатировать, что базовые исходные данные для цепочки расчетов определяются достаточно точно. Таким образом, исключается допущение погрешности на первом их этапе.

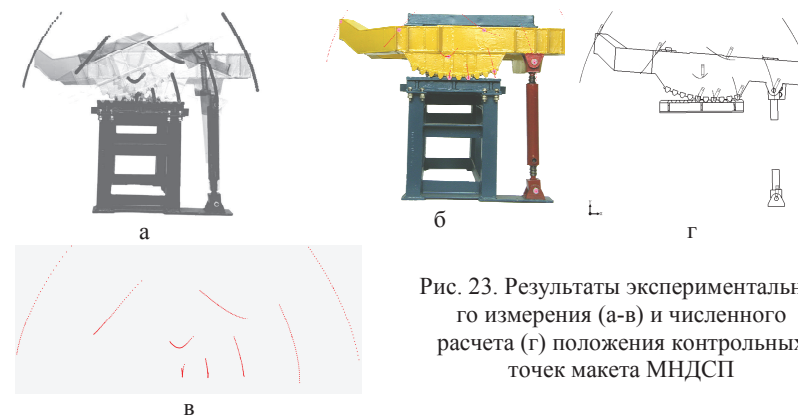


Рис. 23. Результаты экспериментального измерения (а-в) и численного расчета (г) положения контрольных точек макета МНДСП

**Заключение.** В работе описано решение задачи исследования кинематики механизма наклона проектируемой дуговой сталеплавильной печи как составного этапа проектных работ. Созданы модели, которые интегрированы в этапы конструкторских проработок. Получены численные результаты кинематического анализа. Сравнение с экспериментальными исследованиями, зафиксированные на физическом макете, показывает приемлемую точность (погрешность – на уровне 5 %) численного моделирования. Эта точность позиционирования допустима и на реальном объекте. Она обеспечивает штатные режимы слива шлака и стали. Кроме того, полученные результаты численного моделирования могут встраиваться в полный цикл расчетов, поставляя для следующих этапов требуемые исходные данные.

В дальнейшем планируется проведение силового анализа и расчета напряженно-деформированного состояния в рамках общей методики синтеза механизмов данного типа.

**Список литературы:** 1. *Полищук Т.В., Пеклич М.М., Ткачук Н.Н.* Кинематический и силовой расчет механизма наклона плавильной печи // *Механiка та машинобудування*. – 2007. – №1. – С.100-106. 2. *Полищук Т.В., Ткачук Н.Н.* К вопросу о кинематическом и силовом анализе механизма наклона плавильной печи // *Вiсник НТУ "ХПІ"*. Тем. вип.: *Машинознавство та САПР*. – 2007– №29. – С.122-131. 3. *Полищук Т.В.* Оптимальное проектирование механизма наклона плавильной печи: модели для анализа напряженно-деформированного состояния // *Вiсник НТУ "ХПІ"*. Тем. вип.: *Динамика та мiцнiсть машин*. – 2007. – № 38. – С.129-134. 4. *Полищук Т.В.* Модельная задача об изгибе коромысла механизма наклона плавильной печи // *Вiсник НТУ "ХПІ"*. Тем. вип.: *Машинознавство та САПР*. – 2008. – №2. – С.125-144. 5. *Полищук Т.В.* Напряженно-деформированное состояние макета механизма наклона плавильной печи: модели, алгоритмы, результаты // *Вiсник НТУ "ХПІ"*. Тем. вип.: *Машинознавство та САПР*. – 2008. – № 9. – С.103-114. 6. *Полищук Т.В.* К обоснованию выбора параметров конечно-элементной модели макета механизма наклона плавильной печи // *Восточно-европейский журнал передовых технологий* – 2008. – 1/1 (31). – С.46-49. 7. *Чепурной А.Д.* Развитие теории обобщенного параметрического описания сложных механических систем на примере механизма наклона плавильной печи / А.Д.Чепурной, Т.В. Полищук, Н.А. Ткачук // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2008. – №3. – С. 44 –48. 8. *Полищук Т.В.* Анализ сил у механiзмі нахилу плавильної печі / Т.В. Полищук // *Машинознавство – Львів, 2008*. – №1. – С. 14-19. 9. *Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Чепурной А.Д., Орлов Е.А., Ткачук Н.Н.* Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и парамет-

ризованного описания // Механiка та машинобудування. – 2006. – №1. – С.57-79. **10.** *Полищук Т.В.* Комплексные экспериментальные исследования макета механизма наклона технологической машины / Т.В. Полищук, Н.Н. Ткачук // Механiка та машинобудування. – 2006. – №1. – С.26-33. **11.** *Дитрих Я.* Проектирование и конструирование: Системный подход / Я. Дитрих – М.: Мир, 1981. – 456 с. **12.** *Химмельблау Д.* Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмель-блау. – М.: Мир, 1975. – 534 с. **13.** *Сей Ж.* Оптимизация. Теория и алгоритмы / Ж. Сей. – М.: Мир, 1973. – 244 с. **14.** *Лурье А.И.* Аналитическая механика / А.И. Лурье. – М.: Гл. ред. физмат. лит., 1961. – 824 с. **15.** *Лурье А.И.* Теория упругости / А. И. Лурье. – М.: Наука, 1970. – 940 с. **16.** *Артоболевский И.И.* Теория механизмов / И.И. Артоболевский. – М.: Наука, 1965. – 776 с. **17.** *Ткачук Н.Н.* Особенности реализации кинематического метода расчета двухпараметрических передач / Н.Н. Ткачук // Вестник НТУ “ХПИ”. Тем. вып.: Машиноведение и САПР. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2006. – Вып. 3. – С.133–151. **18.** *Васильев А.Ю.* Напряжено-деформированный стан просторовых конструкций: методы автоматизованого аналізу / Васильев А.Ю., Ткачук Н.Н., Головченко В.И. // Машинознавство. – 2006. – №1. – С.23-28. **19.** *Ткачук Н.Н.* Программный комплекс синтеза геометрии и анализа напряженно-деформированного состояния звеньев двухпараметрических передач / Н.А. Ткачук // Вісник НТУ “ХПИ”. Тем. вип.: Проблеми механiчного приводу. – Харкiв: НТУ “ХПР”. – 2007. – Вып. 21. – С.68–76. **20.** *Носко П.Л.* Оптимальное проектирование машиностроительных конструкций / П.Л. Носко. – Луганск: Изд. Восточноукр. ун-та, 1999. – 392с. **21.** *Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / Н.А. Ткачук, Г.Д. Грищенко, А.Д. Чепурной [и др.] // Механiка та машинобудування. – 2006. – №1. – С.57-79.*

Поступила в редакцию 04.04.11

УДК 539.3

**А.Ю. ТАНЧЕНКО**, мл. научн. сотр. каф. ТММиСАПР, НТУ „ХПИ”,  
**А.Н. ТКАЧУК**, аспирант каф. ДПМ, НТУ „ХПИ”,  
**Ю.Б. ГУСЕВ**, канд. техн. наук, гл. конструктор ОАО „Головной специализированный конструкторско-технологический институт”, Мариуполь

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ УГОНЕНИЯ СТЕНОК

Запропоновано підхід до числового моделювання напружено-деформованого стану тонкостінних машинобудівних конструкцій з урахуванням стоншування силових елементів. Задача зводиться до розв’язання задачі чутливості. Варійованими параметрами є параметри відносного стоншування стінок досліджуваної металоконструкції.

Предложен подход к числовому моделированию напряженно-деформированного состояния тонкостенных машиностроительных конструкций с учетом утонения силовых элементов. Задача сводится к решению задачи чувствительности. Варьируемыми параметрами являются параметры относительного утонения стенок исследуемой металлоконструкции.

An approach to the numerical modelling of stress-strained state of thin-walled machine-building constructions is proposed taking into account thinning of power elements. A task is come to the solution of task of sensitiveness. The varied parameters are parameters of relative thinning of investigated metalware walls.

**Введение.** Исследованию напряженно-деформированного состояния крупногабаритных высоконагруженных конструкций с учетом их утонения

посвящено много работ [1-5]. В то же время предложенные в этих работах подходы и модели требуют при проведении многовариантных исследований больших затрат вычислительных ресурсов, поскольку предполагают прямое решение задачи анализа, например, с помощью метода конечных элементов (МКЭ), при различных сочетаниях степени утонения разных секций исследуемой конструкции. На практике такой подход приводит к лавинообразному росту вариантов расчетных схем с увеличением всего до нескольких десятков варьируемых толщин (т. е. степени их утонения). В связи с этим возникает задача создания более экономных схем численного моделирования напряженно-деформированного состояния подобного типа конструкций, что составляет цель исследований.

**1. Общий подход к решению задачи.** Рассматривается тонкостенная конструкция, которая занимает в пространстве область  $\Omega$ . Последнюю можно представить в виде композиций тонкостенных поверхностных участков  $S_k$ ,  $k = 1, \dots, N$ , на которые в направлении нормалей  $\vec{n}_k$  в одну (или в две) сторону нарезан материал номинальной толщины  $h_k^0$ . Естественно, что при этом могут быть области интерференции  $I_{ij}$  и пустот  $Z_{ij}$  (рис. 1). Разрешение этих коллизий представляет отдельную задачу, которая может быть решена разными способами ([www.ptc.com](http://www.ptc.com), [www.ansys.com](http://www.ansys.com)). Считаем, что эта часть задачи уже решена и в дальнейшем имеем дело с конечно-элементной Shell – моделью, у которой  $S_k = \text{const}$ ,  $k = 1, \dots, N$ ,  $h_k = h_k(t)$ .

В результате получаем систему разрешающих уравнений

$$K \cdot x = f, \tag{1}$$

где  $K = K(h(t))$  – изменяемая при утонении во времени матрица жесткости конечно-элементного ансамбля:  $h(t) = \{h_1(t) \dots h_N(t)\}^T$  – массив текущих толщин (для каждого участка  $S_k$ ).

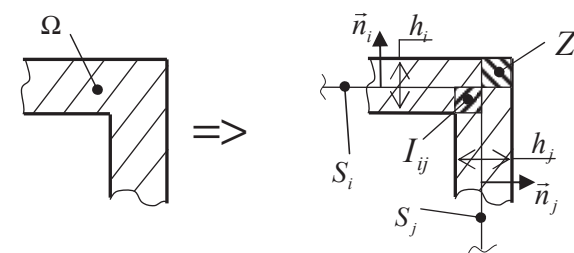


Рис. 1. Представление области  $\Omega$  в виде подобластей  $S_k \times h_k$

Требуется: