

УДК 62-82:621.878

## Обоснование критерия оценки динамических процессов гидромеханического привода рабочих органов землеройно-транспортных машин

С.И. Васильев<sup>1\*</sup>, В.И. Иванчура<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, Красноярск, Россия  
Статья поступила 13.01.2012, принята 10.02.2012

*Рассмотрен подход к формированию критерия оценки работоспособности привода рабочих органов траншейных экскаваторов. В качестве критерия, оценивающего работоспособность системы привода рабочих органов предложен динамический момент, развиваемый гидравлическим приводом, пропорциональный ускорению вала гидромотора позволяющий не только оперативно оценить адаптивные свойства привода по отношению к входным нагрузкам, воздействующих на рабочие органы землеройно-транспортных машин, но и дающий возможность решения задач управления параметрами гидромеханического не регулируемого привода. Предложена математическая модель привода рабочих органов и полученные на ее основе схемы имитационной динамической модели траншейного экскаватора и гидромеханической подсистемы. В имитационной динамической модели выполнено приведение к выходному валу гидромотора нагрузки и моментов инерции рабочего органа. Приводится сравнительный анализ изменения динамического момента при подаче на рабочие органы нагрузок всех типов и изменение параметров привода рабочего органа по упрощенной имитационной модели и при увеличении рабочего объема гидромотора. На основе уравнений обобщенной модели разработана имитационная динамическая модель без учета работы предохранительного и обратного клапанов и при допущении о бесконечной жесткости элементов, передающих механический момент.*

**Ключевые слова:** динамический момент, входной сигнал, выходной управляемый сигнал, рабочий орган, нагрузка, имитационная динамическая модель траншейного экскаватора, рабочий объем гидромотора, гидромеханическая система привода.

## Substantiation of the assessment criterion for the dynamic processes of hydro-mechanical drive of the earthmovers operating members

S.I.Vasiliyev<sup>1\*</sup>, V.I. Ivanchura<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University, 79, Svobodny av., Krasnoyarsk, Russia  
Received 13.01.2012; Accepted 10.02.2012

*The approach to the forming of operability assessment criterion for hydro-mechanical drive of earthmovers operating members has been examined. The dynamic moment gathered by the hydraulic drive and being proportional to the hydraulic motor acceleration has been suggested as a criterion assessing the operating members drive system operability. This enables not only to promptly assess adaptive features of the drive as to input loads acting on the earthmovers operating members, but also makes it possible to solve problems concerning the parameter control of hydromechanical nonadjustable drive. The mathematical model for operating members drive has been suggested, and the simulation dynamic model diagrams of an earthmover and a hydromechanical subsystem have been obtained. The bringing of load and inertia moment of the operating members to the hydraulic motor output shaft has been carried out using the simulation dynamic model. A comparative analysis of the dynamic moment change while setting all types of loads on the operating members and the change in the parameters of operating member drive according to the simplified simulation model and under the hydraulic motor working volume gain is given. Based on the generalized model equations, the simulation dynamic model has been developed without taking into account the safety and return valves operation and on assumption that the elements transferring mechanical moment are of infinite rigidity.*

**Keywords:** dynamic moment, input signal, output controlled signal, operating member, load, simulation dynamic model of a trencher drive, hydraulic motor working volume, drive hydromechanical system.

Алгебраические и графические критерии оценки работоспособности систем трудно применимы для оценки динамических процессов гидромеханических систем привода рабочих органов траншейных экскаваторов, взаимодействующих с мерзлым грунтом. С этой связи лучшей демонстрацией способности системы привода выполнять заданные техническими характери-

стиками функции является характер изменения выходного управляемого сигнала, в качестве которого предложен динамический момент привода рабочих органов землеройно-транспортных машин.

Момент  $M(t)$ , развиваемый радиально-поршневым гидромотором, согласно теории привода [1], при постоянстве приведенного к валу момента инерции  $J_{пр}$ , может быть представлен в виде суммы суммарного приведенного к валу статического момента

\* E-mail address: S-vasilev1@yandex.ru

$M_{c\_np}(t)$  и динамической составляющей  $J_{np} \frac{d\omega_{гм}(t)}{dt}$ , пропорциональной ускорению вала гидромотора  $\frac{d\omega_{гм}(t)}{dt}$ :

$$M(t) = J_{np} \frac{d\omega_{гм}(t)}{dt} + \sum M_{c\_np}(t)$$

Эту составляющую назовем динамическим моментом  $M_d(t) = J_{np} \frac{d\omega_{гм}(t)}{dt}$ . Динамический момент, таким образом, полностью определяется изменениями скорости  $\frac{d\omega_{гм}(t)}{dt}$ . Так, при изменениях скорости, вызванных изменениями нагрузки на рабочем органе, разрабатывающем мерзлый грунт, этот динамический момент (критерий оценки) полностью отвечает на изменения  $\sum M_{c\_np}(t)$  и отображает их влияние на устойчивость системы управления.

Динамический момент как критерий оценки состояния системы привода рабочего органа траншейного экскаватора определяется уравнением:

$$J_{np} \frac{d\omega_{гм}(t)}{dt} = M(t) - \sum M_{c\_np}(t)$$

В момент, когда правая часть уравнения равно нулю, динамический момент как критерий оценки динамического режима теряет смысл.

Преимуществом такого критерия является возможность не только оперативно оценить адаптивные свойства привода по отношению к входным нагрузкам, воздействующих на рабочие органы землеройно-транспортных машин, но и появляющаяся возможность решения задач управления параметрами гидромеханического не регулируемого привода [1]. Как известно рабочий объем не регулируемого радиально-поршневого гидромотора, используемого в системах привода рабочих органов траншейных экскаваторов, зависит от угла установки корпуса относительно выходного вала [2], изменение его под действием управляющего сигнала, адекватного динамическому моменту привода, приводит к уменьшению пульсации давления рабочей жидкости в гидросистеме.

Как следует из уравнений состояния системы привода [3] ускорение вала, определяющее динамический момент гидромотора зависит от рабочего объема  $q_{гм}$

$$\frac{dP_H}{d\tau} = q_H \cdot A_1 - \omega_{гм} \cdot A_2 - Q_{пк}(x_{пк}) \cdot A_3 + Q_{ок}(x_{ок}) \cdot A_3 - P_H \cdot A_4;$$

$$\frac{d\omega_{гм}}{d\tau} = A_{13} \cdot (P_H - P_C) - A_{14} \cdot \int_0^t \frac{d\omega_{гм}(t)}{dt} - A_{15} \cdot (P_H - P_C) - A_{30} - A_{16} \cdot \left( \int_0^t \frac{d\omega_{гм}(t)}{dt} - A_{17} \int_0^t \frac{d\omega_{по}(t)}{dt} \right);$$

$$\frac{d\omega_{по}}{d\tau} = A_{18} \cdot \left( \int_0^t \frac{d\omega_{гм}(t)}{dt} - A_{19} \int_0^t \frac{d\omega_{по}(t)}{dt} \right) -$$

$$- (M_1(k_T) \cdot A_{20} + A_{21} \cdot M_2(h) + A_{21} \cdot M_3(V)).$$

Поэтому на основе вышеприведенных уравнений обобщенной модели, была разработана имитационная динамическая модель без учета работы предохранительного и обратного клапанов и при допущении о бесконечной жесткости элементов, передающих механический момент. В имитационной динамической модели выполнено приведение к выходному валу гидромотора нагрузки и моментов инерции рабочего органа. В результате число уравнений в упрощенной динамической модели привода рабочего органа траншейного экскаватора сократилось до двух:

$$\frac{dP_H}{d\tau} = q_H \cdot A_1 - \omega_{гм} \cdot A_2 - Q_{пк}(x_{пк}) \cdot A_3 + Q_{ок}(x_{ок}) \cdot A_3 - P_H \cdot A_4;$$

$$\frac{d\omega_{по}}{d\tau} = A_{18} \cdot \left( \int_0^t \frac{d\omega_{гм}(t)}{dt} - A_{19} \int_0^t \frac{d\omega_{по}(t)}{dt} \right) - (M_1(k_T) \cdot A_{20} + A_{21} \cdot M_2(h) + A_{21} \cdot M_3(V)).$$

Упрощенные схемы имитационной динамической модели траншейного экскаватора, разработанной для исследования динамических процессов, связанных с изменением производительности гидравлического мотора приведены на рис. 1 и 2.

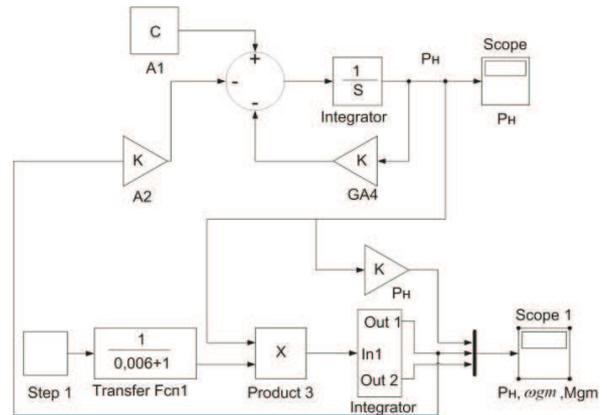


Рис. 1. Схема точной имитационной динамической модели траншейного экскаватора.

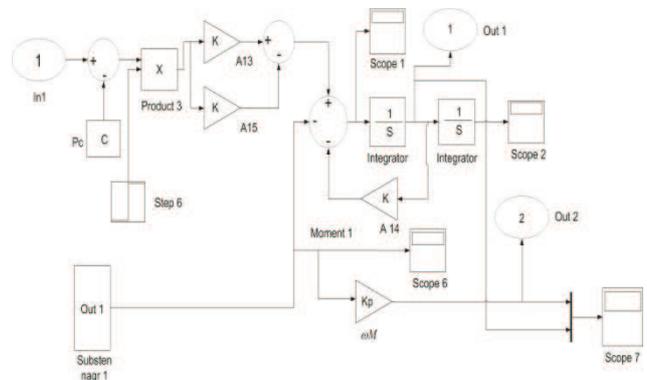
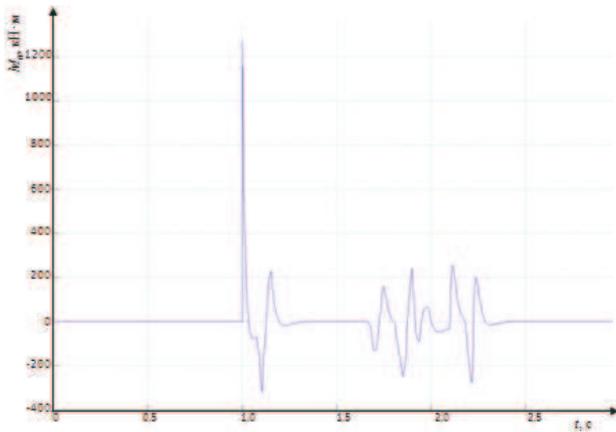


Рис. 2. Схема гидромеханической подсистемы точной имитационной динамической модели траншейного экскаватора.

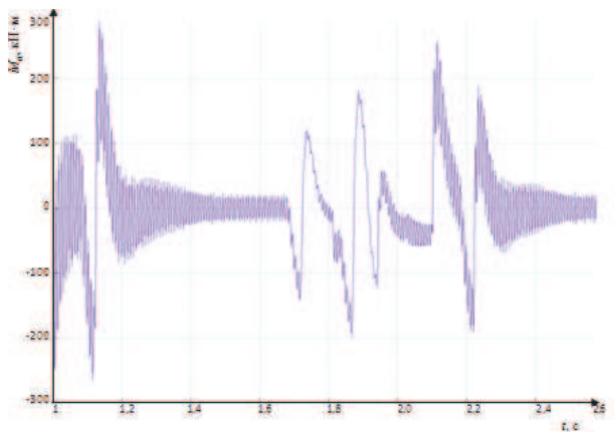
Сравнение результатов моделирования показывает, что увеличение рабочего объема радиально-поршневого гидромотора на 2,7 % приводит к таким

же увеличением динамического момента и уменьшению скорости гидромотора при снижении колебаний давления в гидросистеме, что хорошо видно из сравнения рис. 7 и 8, суммарное время работы предохранительного клапана за тот же цикл воздействия нагрузки на рабочий орган траншейного экскаватора при этом уменьшается (рис. 11, 12).

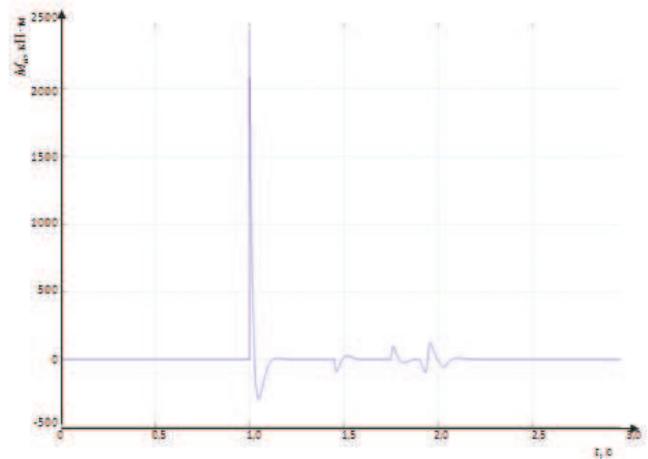
На рис. 3 и 4 представлены результаты моделирования при помощи упрощенной имитационной модели и воздействия на систему привода нагрузки первого типа, на рис. 6, 9 – результаты моделирования динамического момента на упрощенной и точной моделях при увеличении рабочего объема высокомоментного гидромотора на 2,7 %. Общим для рассматриваемых случаев является снижение амплитуды колебаний критерия, что позволяет сделать общий вывод о том, что работоспособность системы управления при увеличении рабочего объема высокомоментного гидромотора сохраняется.



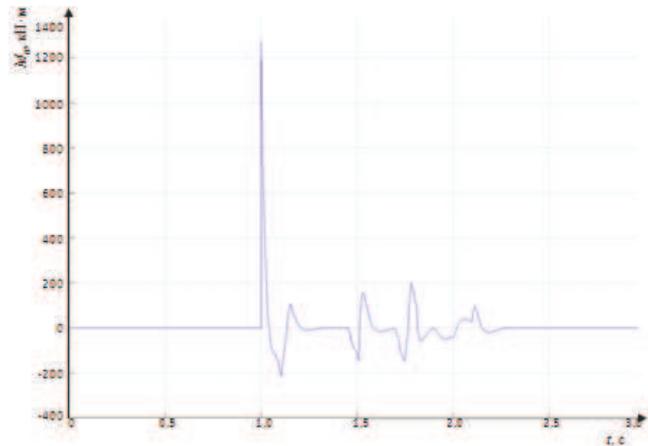
**Рис. 3.** Осциллограмма динамического момента, отнесенного к моменту инерции при воздействии нагрузок первого типа на систему привода рабочего органа упрощенной имитационной модели.



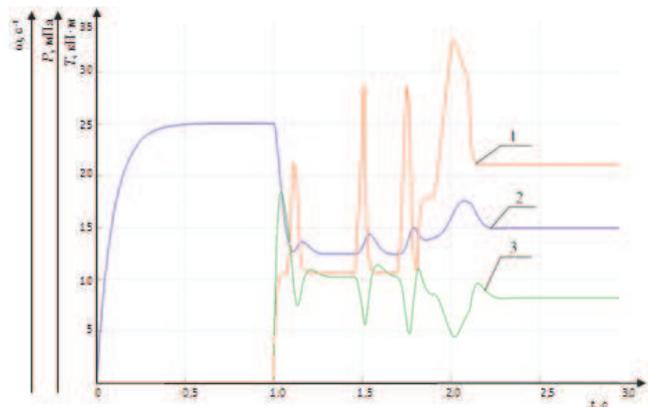
**Рис. 4.** Осциллограмма динамического момента при воздействии нагрузок первого типа и увеличении  $q_m$  на 2,7 % (начальное время подключения нагрузки  $t = 1$  с).



**Рис. 5.** Осциллограмма динамического момента, отнесенного к моменту инерции при воздействии нагрузок второго типа упрощенной имитационной моделью.



**Рис. 6.** Осциллограмма динамического момента, отнесенного к моменту инерции при воздействии нагрузок третьего типа упрощенной имитационной.



**Рис. 7.** Изменение параметров привода рабочего органа траншейного экскаватора при воздействии нагрузок третьего типа по упрощенной имитационной модели.

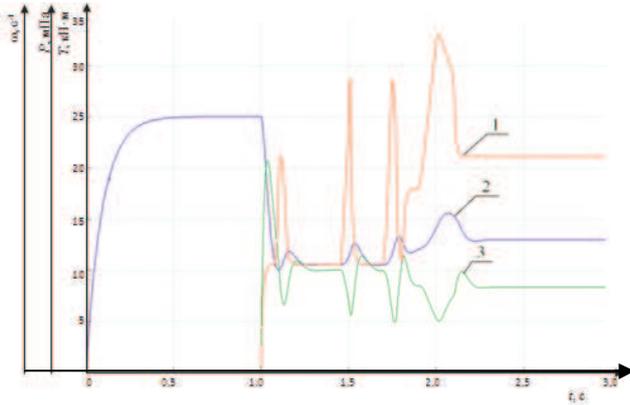


Рис. 8. Изменение параметров привода рабочих органов при воздействии нагрузок третьего типа и увеличении  $q_m$  увеличено на 2,7 % по упрощенной имитационной модели

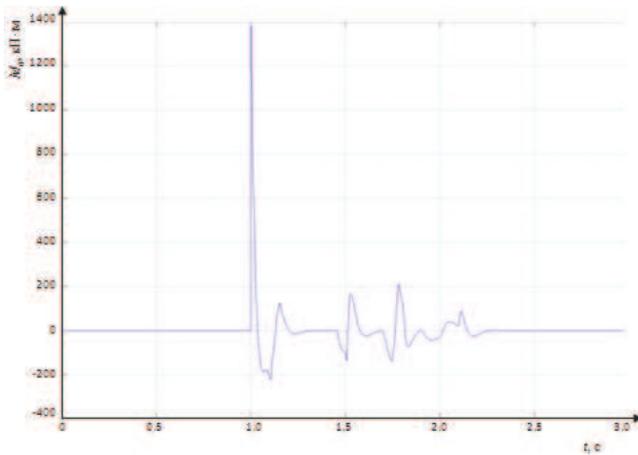


Рис. 9. Изменение динамического момента, отнесенного к моменту инерции при воздействии нагрузок третьего типа и увеличении  $q_m$  на 2,7 % по упрощенной имитационной модели.

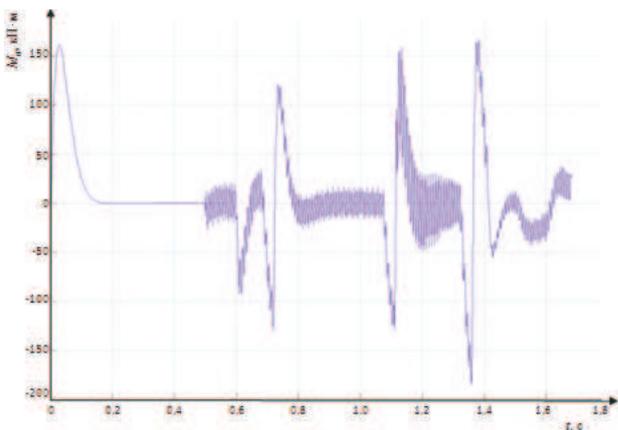


Рис. 10. Изменение динамического момента, отнесенного к моменту инерции, при воздействии на систему привода нагрузок третьего типа и увеличении  $q_m$  на 2,7 % по точной имитационной моделию.

Осциллограмма изменения динамического момента, полученная при использовании точной модели, позволяет выявить существенные амплитудные колебания

этого критерия, которые не выявляются на осциллограмме упрощенной модели.

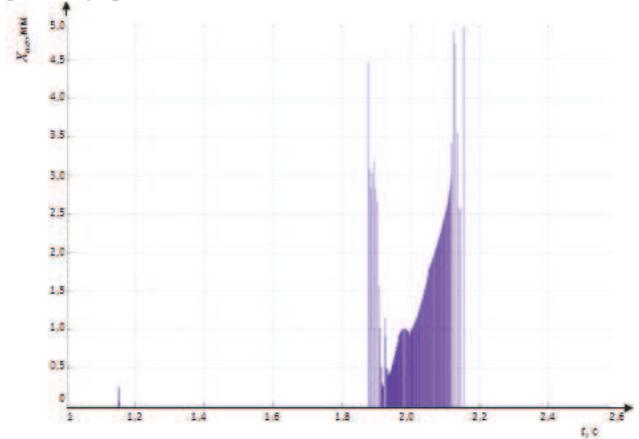


Рис. 11. Перемещение предохранительного клапана при воздействии на систему привода нагрузок первого типа (фрагмент осциллограммы обработки, начальное время подключения нагрузки  $t = 1$  с).

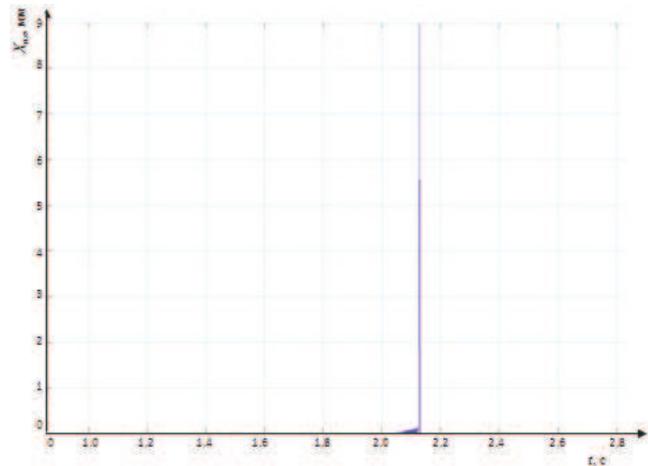


Рис. 12. Фрагмент осциллограммы перемещения предохранительного клапана при воздействии на систему привода нагрузок первого типа и увеличении рабочего объема высокомоментного гидромотора на 2,7% (время подключения нагрузки  $t = 1$  с).

### Выводы.

1. Критерием, оценивающим работоспособность системы привода рабочих органов, работающей в динамическом режиме работы, и взаимодействующих с разрабатываемым мерзлым грунтом, является динамический момент, развиваемый гидравлическим приводом, момента пропорциональный ускорению вала гидромотора  $d\omega_{гм}(t)/dt$  и приведенному к этому валу моменту инерции гидромотора  $J_{гм. пр}$ .

2. Увеличение рабочего объема высоко моментного радиально поршневого гидромотора привода рабочего органа траншейного экскаватора не нарушает работоспособное состояние системы привода и способствует снижению амплитуды давления в напорной магистрали.

## Литература

1. Ключев В. И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1985. 560 с.
2. Ереско С.П., Рушелюк Г.М., Ереско Т.Т. Математическое моделирование системы автоматического регулирования гидропривода роторного траншейного экскаватора // Современные проблемы качества, математического моделирования и информационных технологий : материалы Междунар. науч.-техн. конф. и Рос. науч. шк. М., 2001. Ч. 3. С. 39–40.
3. Васильев С.И., Иванчура В.И. Численное моделирование рабочего процесса привода рабочего органа роторного траншейного экскаватора // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 4 (7). С. 15–21.

## Reference

1. Klyuchev V. I. The electric drive theory M.: Energoatomizdat, 1985. 560 s.
2. Eresko S. P., Rushelyuk G.M., Eresko T.T. Mathematical modeling of the automatic control system of a rotary trenching machine hydraulic drive / S. P. Eresko, G. M. Rushelyuk, T. T. Eresko // Sovremennye problemy kachestva, matematicheskogo modelirovaniya i informatsionnykh tekhnologiy: materialy Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. i Ros. Nauch. shk. M., 2001. Ch. 3. S. 39-40.
3. Vasiliev S. I., Ivanchura V.I. Numerical modeling of the drive working process for a rotary trenching machine operating member // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2011. № 4 (7). S. 15–21.

УДК 621.879.3

## Прочностной анализ конструкции ковша экскаватора ЭО-3323 при помощи САПР с целью установки противоадгезионных устройств

С.А. Зеньков<sup>1\*</sup>, Е.В. Курмашев<sup>1</sup>, А.С. Козик<sup>1</sup>, М.С. Банщиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Братский государственный университет, Макаренко 40, Братск, Россия  
Статья поступила 15.12.2011, принята 20.02.2012

С применением современных САПР (CAD) программ была построена трехмерная твердотельная модель ковша одноковшового экскаватора ЭО-3323, для нее выбрана тетраэдральная сетка из десятиузловых элементов второго порядка. Представленная модель была импортирована в препроцессор подготовки моделей для конечно-элементного анализа APM WinMachine. Создание конечно-элементной модели осуществлялось на основе импортированной из КОМПАС-3D геометрической модели в APM Studio. Произведен расчет напряженно-деформированного состояния ковша под действием сил, возникающих при копании грунта оборудованием «обратная лопата». Построены карты перемещений, деформаций и напряжений в ковше и выявлены наиболее и наименее напряженные места. Разработка влажных связных грунтов связана с налипанием грунта на рабочие органы одноковшовых экскаваторов и снижением их производительности. При этом снижение производительности происходит из-за уменьшения полезной вместимости ковшевой за счет неполной выгрузки, увеличения лобового сопротивления при резании (копании) в результате прилипания влажного грунта к рабочему органу, роста сопротивления входа в ковш, увеличения простоя машин ввиду необходимости очистки рабочих органов. Кроме того, растут энергетические потери из-за увеличения сил трения, и снижается качество выполняемых работ. Сила трения при копании и планировке составляет 30...70 % от общего сопротивления копанью, а производительность снижается в 1,2...2 раза и более. При вибротеплом воздействии появляется новый технологический эффект, заключающийся в увеличении диапазона влажности эффективного применения и резком снижении силы трения. Для разрушения адгезионных связей при подогреве требуется меньшая вынуждающая сила вибратора. Вибрация ускоряет подогрев контактного слоя, что снижает затраты тепловой энергии, однако встает вопрос о месте размещения пьезокерамических преобразователей на ковше экскаватора. Определены места, где для снижения адгезии грунта к ковшам экскаваторов можно расположить пьезокерамические устройства, которые наиболее эффективны при применении комбинированных (вибротепловых) методов воздействия. Использование этих устройств позволяет устранить налипания и повысить эффективность работы одноковшовых экскаваторов при работе на влажных связных грунтах.

**Ключевые слова:** САПР, CAD (Computer-Aided Design), ковш экскаватора, трехмерная твердотельная модель, напряжения, перемещения, деформации, адгезия грунта, пьезокерамические преобразователи.

\* E-mail address: mf@brstu.ru