

УДК 625.76.08

А.В. Семенов, С.И. Вахрушев**A.V. Semenov, S.I. Vakhrushev**Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

Perm National Research Polytechnic University

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ
ОДНОКОВШОВЫХ ЭКСКАВАТОРОВ****RESEARCH OF SINGLE BUCKET EXCAVATOR STABILITY**

Рассмотрены расчеты устойчивости одноковшовых экскаваторов, и приведены характерные положения, где наиболее вероятно опрокидывание машины. Представлены расчеты коэффициента запаса устойчивости с учетом статических и динамических нагрузок, действующих на экскаватор и стремящихся его опрокинуть. Предложены различные конструктивные схемы, поясняющие условия нарушения устойчивости. Проведено сравнение экскаваторов с моноблочной и составной стрелой, а также коэффициентов запаса устойчивости экскаваторов с канатно-блочным управлением и гидравлическим управлением в рабочем положении. Экскаватор с гидравлическим управлением имеет ряд особенностей, заключающихся в том, что при потере устойчивости машинист экскаватора может вернуться в исходное положение при опирании рабочего оборудования на грунтовое основание. Данная ситуация является нештатной и ведет к таким негативным последствиям, как снижение эксплуатационной производительности, связанной с потерей времени на выравнивание машины и приведение ее в рабочее состояние. Предложено применение уравновешивающего гидроцилиндра, улучшающего устойчивость экскаватора.

Ключевые слова: устойчивость, одноковшовый экскаватор, коэффициент запаса устойчивости, ребро опрокидывания, расчетная схема устойчивости экскаватора, уравновешивающий гидроцилиндр.

In the article, we review stability estimation of single bucket excavator. We mention typical situations, where the machine is more likely to be overturned. We calculate the factor of safety, taking into account all the major forces acting on the excavator. Various schemes are proposed, which clarify the conditions of unstable stability. A comparison with the excavators and an integral one-piece boom. Calculation of stability when digging soil has relative character as loss of stability drives to capsizing cars concerning capsizing edge, at simultaneous support on the hinged equipment, the Driver of the excavator in this case can correct position of the machine. However, this situation is supernumerary and conducts to decline in production, loss of time and so on – all this results in need of this calculation. We review the buckets of active actions and their impact on the stability of the excavator.

Keywords: stability, single bucket excavator, factor of safety, moment about overturning edge, structural diagram, balance cylinder.

Устойчивость экскаватора – способность машины противостоять внешним нагрузкам, включающим силы тяжести грунта в ковше, а также составных частей экскаватора, сопротивление грунта копанию и силы инерции, ко-

торые не дают опрокинуться и сдвинуться опорной части экскаватора относительно грунтового основания [1].

Устойчивость строительной машины характеризуется коэффициентом запаса устойчивости:

$$K_y = \frac{M_y}{M_{\text{опр}}}, \quad (1)$$

где M_y – момент относительно ребра опрокидывания восстанавливающих (удерживающих) сил, Н·м; $M_{\text{опр}}$ – момент относительно ребра опрокидывания опрокидывающих сил, Н·м.

При расчете коэффициента запаса устойчивости экскаватора во всех его состояниях, за исключением копания грунта, принимаем $K_y > 1,15$ [2].

Расчет устойчивости при копании грунта принимается условно, в связи с тем что потеря устойчивости в этом случае ведет к опрокидыванию машины относительно ребра опрокидывания при одновременной опоре на навесное оборудование. Тогда коэффициент запаса устойчивости $K_y > 1,05-1,1$ [3].

Устойчивость экскаватора делять на две группы: первая – устойчивость машины при копании грунта, вторая – все остальные состояния экскаватора.

Рассмотрим первую группу устойчивости экскаватора. Для этого разберем металлоконструкции рабочего оборудования экскаватора (рис. 1). Ими являются стрела 1, которая крепится к поворотной платформе 7; рукоять 2; ковш 3; рабочее оборудование приходит в движение при помощи гидроцилиндров 4–6.

Стрелы экскаваторов бывают двух видов: моноблочные (см. рис. 1, а) и составные (см. рис. 1, б). Моноблочные стрелы легче составных на 15–30 % [4]. Это является немаловажным фактором при расчете экскаватора на устойчивость.

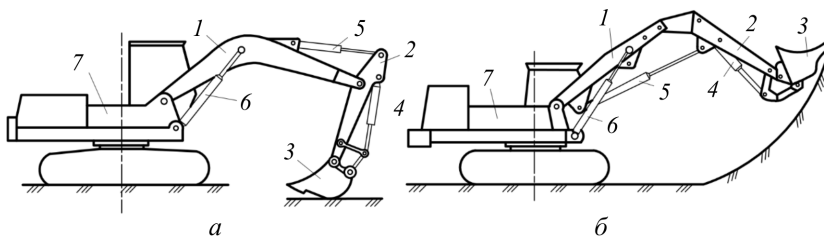


Рис. 1. Рабочее оборудование одноковшового гидравлического экскаватора оборудованного обратной (а) и прямой (б) лопатой, имеющие следующие параметры: 1 – стрела; 2 – рукоять; 3 – ковш; 4–6 – гидроцилиндры подъема стрелы, поворота рукояти и ковша; 7 – поворотная платформа

Проанализируем методику определения расчетных положений рабочего оборудования одноковшового экскаватора. При копании грунта на рукоять и стрелу действуют силы, передаваемые от ковша через шарнир, а также силы на штоках гидроцилиндров (рис. 2, *а*). На ковш действует сила сопротивления копанию P . Массой элементов конструкции и массой грунта в ковше при поиске расчетного положения можно пренебречь.

Не трудно заметить, что чем прочнее грунт, тем больше сила P . Максимальное значение силы P и нагрузка металлоконструкций достигаются при упоре ковша в непреодолимое препятствие, который происходит при самых различных положениях стрелы, рукояти и ковша.

Из-за ограничений условий устойчивости (рис. 2, *б*) сила P достигает максимального значения P_N не во всех положениях рабочего оборудования. На рис. 3, *а* сила P не может превзойти значения P_U :

$$P_U = \frac{Gx_1}{x_2}, \quad (2)$$

где G – сила тяжести экскаватора, при этом значении начнется опрокидывание экскаватора относительно точки U .

В положении, показанном на рис. 2, *б*, ограничением является начало опрокидывания относительно ребра T . На рис. 2, *в* при $P = Gf$ (где f – коэффициент сопротивления перемещению машины) показано «проскальзывание» экскаватора по опорной поверхности грунта.

Случай, представленный на рис. 2, *г*, вызывает особенный интерес, так как линия действия силы P проходит через опорную площадку и опрокидывание невозможно. Сила P не ограничена условиями устойчивости и достигает большого значения. Это говорит о том, что в рассматриваемом сечении возникает максимальный изгибающий момент.

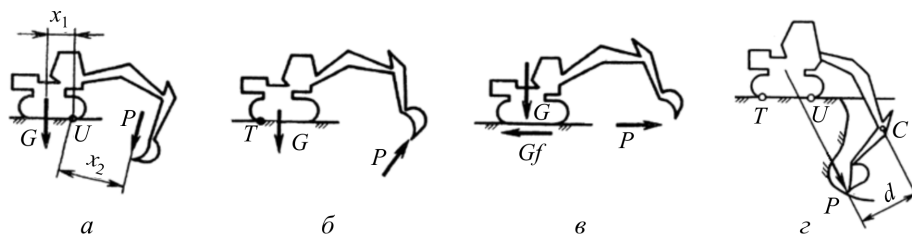


Рис. 2. Схемы, поясняющие условия нарушения устойчивости экскаватора

Рассмотрим вторую группу устойчивости экскаваторов, оборудованных прямой и обратной лопатой.

Устойчивость экскаватора, оборудованного прямой лопатой, определяется для четырех случаев.

1. При отрыве препятствия (см. рис. 3, *a*), например в виде каменной глыбы, рассмотрим, что машина установлена в горизонтальной плоскости; рабочее оборудование установлено поперек ходовых устройств; ковш порожний; зубья ковша расположены на уровне напорного вала; стрела наклонена к горизонту под углом 45° ; подъемные канаты вертикальны; на режущей кромке ковша реализуется максимальное усилие, соответствующее $S_{n \max}$. Для машин с гидравлическим приводом усилие на зубьях ковша отвечает давлению срабатывания предохранительного клапана гидросистемы. Описанному случаю соответствует возможное опрокидывание экскаватора относительно наружных граней выносных опор, опорных катков, пневматических шин. Коэффициент запаса устойчивости вычисляется по формуле

$$K_y = \frac{M_y}{M_{\text{опр}}} = \frac{G_T r_T + G_{\Pi} r_{\Pi} + g_{\text{пр}} r_{\text{пр}}}{P_{\max} l_3 + g_k l_k + g_p l_p + g_c l_c}, \quad (3)$$

где P_{\max} – максимальное вертикальное усилие на режущей кромке ковша, определяемое из условия равновесия рукояти, Н; G_T – сила тяжести ходовой тележки, Н; g_p, g_k, g_c – силы тяжести рукояти, ковша и стрелы, Н; G_{Π} – сила тяжести поворотной платформы с расположенными на ней устройствами, Н·м; $g_{\text{пр}}$ – сила тяжести противовеса, Н; плечи $r_T, r_{\Pi}, r_{\text{пр}}, l_3, l_k, l_p, l_c$ даны на рис. 1.

Коэффициент запаса устойчивости – в интервале 1,05–1,1.

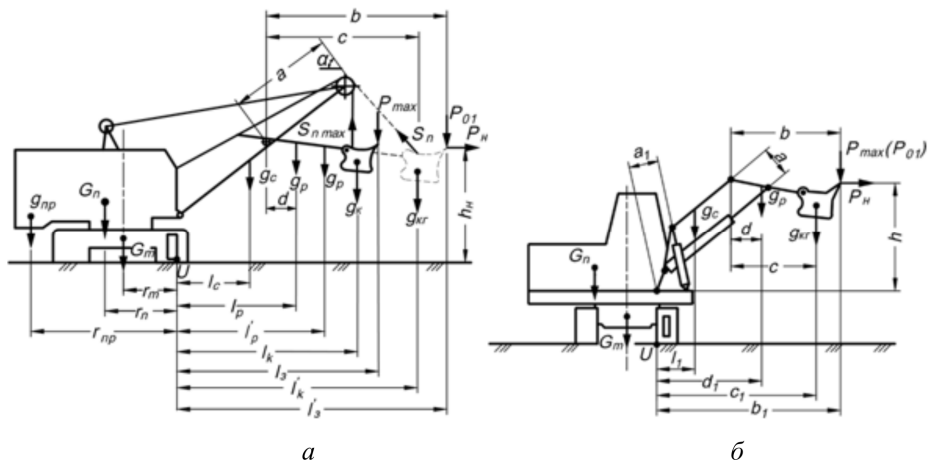


Рис. 3. Схема для определения устойчивости одноковшового экскаватора, оборудованного прямой лопатой, в рабочем процессе: *a* – канатно-блочным управлением; *б* – с гидравлическим управлением

2. При стандартной работе экскаватора (см. рис. 3, а) предполагается, что машина установлена в горизонтальной плоскости, рабочее оборудование расположено поперек ходовых устройств; рукоятка горизонтальна и максимально выдвинута; стрела наклонена к горизонту под углом 45° ; ковш заполнен грунтом; в подъемных канатах действует рабочее усилие, а напорное усилие, равное половине рабочего (P_2), которое перемещает ковш на себя, направленное к забою. Для машин с гидравлическим приводом в первую очередь вычисляют усилие P_1 , рассматривая поворот рукоятки относительно стрелы под действием в цилиндрах усилий, которые соответствуют номинальному давлению в гидросистеме. Значение усилия P_2 , направленного от себя, определяют исходя из реализации в стреловых гидроцилиндрах номинального давления масла при уже найденном значении P_1 .

Опрокидывание машины возможно относительно или пневматических шин, или внешних граней опорных катков, или выносных опор. Опрокидывающий и удерживающий моменты рассчитывают по схеме, которая изображена на рис. 3, а:

$$K_y = \frac{M_y}{M_{\text{опр}}} = \frac{G_{\text{т}} r_{\text{т}} + G_{\text{н}} r_{\text{н}} + g_{\text{пр}} r_{\text{пр}}}{P_1' l_3' + P_{\text{н}} r_{\text{н}} + g_{\text{кр}} l_{\text{к}}' + g_{\text{п}} l_{\text{к}}' + g_{\text{с}} l_{\text{с}}}. \quad (4)$$

Входящие в верхнее равенство значения P_1 , $P_{\text{н}}$ устанавливают из уравнений равновесия рукоятки с ковшом относительно оси напорного вала:

– для машины с канатным приводом:

$$P_1 = \frac{S_{\text{н}} a - g_{\text{кр}} c - g_{\text{п}} d}{b}; \quad (5)$$

$$P_{\text{н}} = \frac{1}{2} S_{\text{н}} + S_{\text{н}} \cos \alpha. \quad (6)$$

– для машины с гидравлическим приводом (рис. 3, б):

$$P_1 = \frac{P_{\text{ц.п}} a - g_{\text{кр}} c - g_{\text{п}} d}{b}; \quad (7)$$

$$P_{\text{н}} = \frac{P_{\text{ц.с}} a_1 - P_{01} b_1 + g_{\text{кр}} c_1 + g_{\text{п}} d_1 + g_{\text{с}} l_1}{h}, \quad (8)$$

где $P_{\text{н}}$ – центробежная сила от поворота платформы, проходящая через центр тяжести ковша и пересекающая ось платформы под углом 90° ; $P_{\text{ц.п}}$, $P_{\text{ц.с}}$ – уси-

лия в гидроцилиндрах поворота рукоятки и стрелы, H ; S_{II} , S_{II} – натяжение канатов, H ; $g_{кр}$ – сила тяжести ковша с грунтом, H .

Коэффициент запаса устойчивости – в интервале 1,05–1,1.

3. Экскаватор в транспортном положении движется на подъем. Стрела экскаватора с канатно-блочным управлением наклонена к опорной поверхности под наименьшим углом (около 30°), ковш находится у земли, рукоять полностью выдвинута (рис. 4, а). У машины с гидравлическим приводом рабочее оборудование зафиксировано в транспортном положении. Опрокидыванию машины в первую очередь способствует ветровая нагрузка. Расчет устойчивости будем вести для максимально наклоненной опорной поверхности движения. Наибольший угол подъема находится в условиях осуществления предельного сцепления гусениц (колес) с дорогой или тягового усилия:

$$\operatorname{arctg} \varphi_c \geq \alpha_{\max} \leq \alpha_N, \quad (9)$$

где φ_c – коэффициент сцепления гусениц (колес) с дорогой; α_N – угол подъема, определяемый тяговым расчетом.

$$\sin \alpha_N = \frac{N_\eta}{G_3 v_{\min} (1 + f^2)} - f \sqrt{1 + f^2 - \left[\frac{N_\eta}{G_3 v_{\min} (1 + f^2)} \right]^2}, \quad (10)$$

где N – мощность силовой установки, Вт; v_{\min} – минимальная скорость передвижения экскаватора, м/с; G_3 – сила тяжести всего экскаватора, H ; f – коэффициент сопротивления движению; η – КПД трансмиссии.

Потеря устойчивости экскаватора возможна относительно задних колес (точка T , см. рис. 4, а). Коэффициент запаса устойчивости экскаватора определяется по формуле

$$K_y = \frac{M_y}{M_{\text{опр}}} = \frac{G_3 r_3 \cos \alpha_{\max}}{G_3 h_{II} \sin \alpha + k_3 F_{\text{вп}} k p_b r_b} \geq 1,2, \quad (11)$$

где h_{II} – высота центра тяжести экскаватора, м; r_3 – расстояние между направлением осью опрокидывания с учетом выбранного положения рабочего оборудования и составляющей $G_3 \cos \alpha$, м; $F_{\text{вп}}$ – площадь наветренной поверхности экскаватора, ограниченная его контуром, м^2 ; k_3 – коэффициент заполнения наветренной поверхности экскаватора, $k_3 = 1$; k – коэффициент аэродинамического сопротивления, $k = 1,2$; p_b – расчетное давление ветра, примем равным 250 Па.

4. Экскаватор в транспортном положении движется под уклон (рис. 4, б), рукоять висит вертикально, стрела экскаватора с канатно-блочным управлением наклонена к опорной поверхности под максимальным углом. У экскаватора с гидроприводом рабочее оборудование закреплено в транспортном положении. Ветер направлен против движения, $p_b = 250$ Па. Для вычисления наибольшего угла уклона используем формулу (10) для расчетного случая 3. Опрокидывание может произойти относительно точки контакта (точка U , см. рис. 4, б) с опорной поверхностью направляющих колес. Коэффициент запаса устойчивости экскаватора вычисляется по формуле

$$K_y = \frac{M_y}{M_{\text{опп}}} = \frac{G_3 r'_3 \cos \alpha_{\text{max}}}{G_3 h'_3 \sin \alpha_{\text{max}} + k_3 F'_{\text{оп}} k p_b r'_b} \geq 1, 2, \quad (12)$$

где $r'_3, h'_3, F'_{\text{оп}}, r'_b$ – обозначения, что и в формуле (12), но значения принимаем с учетом иных положений ковша и точки опрокидывания (точка T).

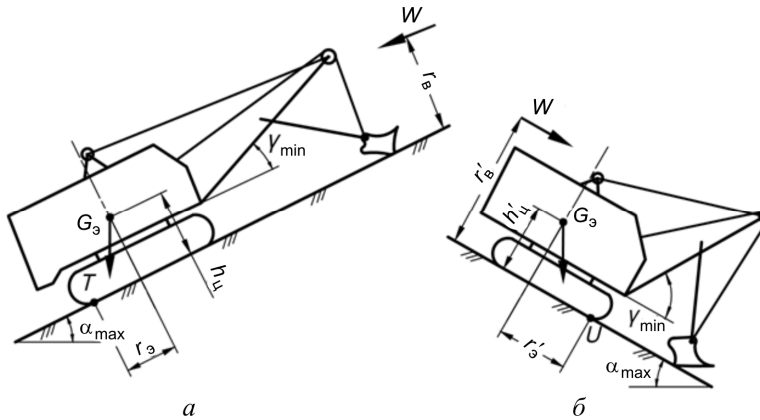


Рис. 4. Схемы для определения устойчивости одноковшового экскаватора:
а – при движении на подъем; б – при движении под уклон

Расчет для экскаватора, оборудованного обратной лопатой, при копании выполняется для двух положений:

1. Экскаватор находится на горизонтальной площадке, происходит отрыв ковша от грунта у бровки забоя под действием максимальных усилий, которые создаются при помощи подъема стрелы (рис. 5). Направление реакции грунта на зубья ковша перпендикулярно линии, соединяющей центр поворота стрелы и режущую кромку ковша. У машины с канатно-блочным управлением

$$R = \frac{1}{r_R} = S_{\text{пmax}} r_{\text{и}} - g_k r_k - g_p r_p - g_c r_c, \quad (13)$$

если используется гидропривод

$$R = \frac{1}{r_R} = P_{ц\max} r_{ц} - g_k r_k - g_p r_p - g_c r_c, \quad (14)$$

где $S_{п\max}$ – максимальное усилие в стрелоподъемном полиспасте, Н; $P_{ц\max}$ – усилие, развиваемое стрелоподъемными цилиндрами при максимальном давлении в гидросистеме, Н.

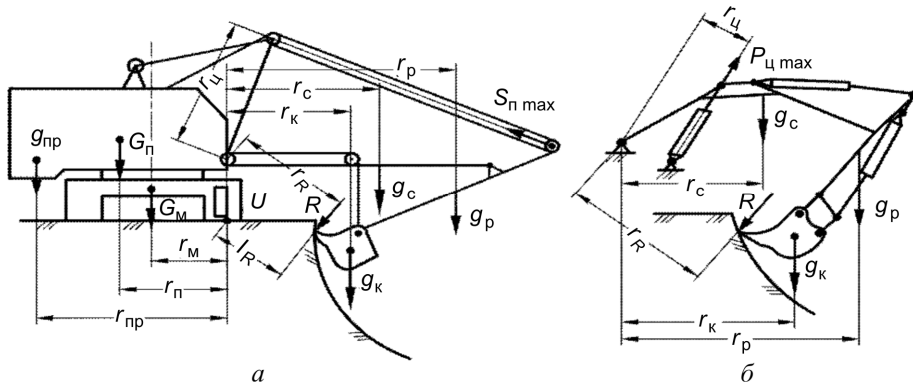


Рис. 5. Схема для определения устойчивости экскаватора, оборудованного обратной лопатой, при расчетном положении 1:
а – канатно-блочное управление; б – гидропривод

Коэффициент запаса устойчивости для положения 1:

$$K_y = \frac{G_m r_m + G_n r_n + g_{пp} r_{пp}}{R l_R + g_k r_k + g_c r_c + g_p r_p}. \quad (15)$$

2. Машина расположена на поверхности, наклоненной к горизонту под углом 12° . Производится выгрузка вязкого грунта при максимальном вылете ковша (рис. б). Тогда коэффициент запаса устойчивости равен

$$K_y = \frac{A}{(A + g_{кг} h_k + g_p r_p + g_c h_c) \operatorname{tg} \alpha + g_{кг} l_k + g_p l_p + g_c l_c}, \quad (16)$$

где $A = G_r h_r + G_n h_n + g_{пp} h_{пp}$; $K_y \geq 1,15$.

Рассмотрим результаты анализа устойчивости одноковшового экскаватора с оборудованием «обратная лопата» (рис. 7). На графике представлены зависимости коэффициентов устойчивости экскаватора ЭО-4125, оборудованного обратной лопатой, с ковшом вместимостью $q = 1 \text{ м}^3$ от угла поворота

платформы α_n , где КС – коэффициент статической устойчивости, который определяется с учетом силы тяжести грунта в ковше и элементов конструкции; КВС – коэффициент устойчивости, вычисляемый по методике «ВНИИстрой-дормаш», с учетом центробежных сил, действующих на элементы конструкции при повороте платформы, а также сил тяжести (данный коэффициент рассматривается в статье [5]); К – коэффициент устойчивости, определяемый с учетом сил инерции, тяжести, центробежных, ветрового давления, Кориолиса.

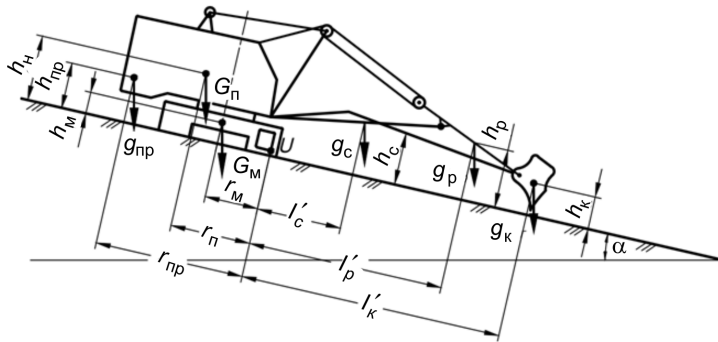


Рис. 6. Схема для определения устойчивости экскаватора, оборудованного обратной лопатой, при расчетном положении 2

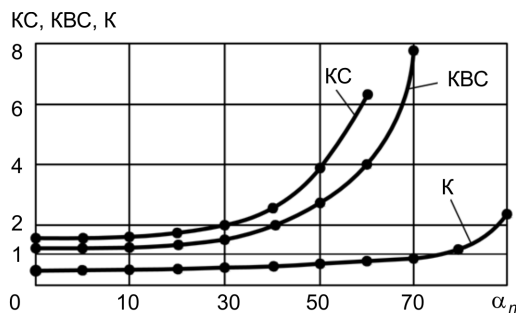


Рис. 7. График зависимости коэффициента устойчивости от угла поворота платформы

К, КС, КВС соответствуют наихудшему для устойчивости сочетанию углов наклона стрелы рукоятки, ковша. График показывает, что устойчивость экскаватора ЭО-4125 обеспечена при любом угле поворота платформы, поскольку $КС > 1$ и $КВС > 1$. Однако $К$ при $\alpha_n \leq 80^\circ$ меньше 1, что говорит об отрыве основания опор, которые не лежат на ребре опрокидывания, отклонении от опорной поверхности на угол, не превышающий 2° [6].

На основе проведенного патентного исследования предлагается использовать один из способов предотвращения опрокидывания экскаватора в рабочем положении, который заключается в использовании уравнивающего

цилиндра в гидросистеме экскаватора (рис. 8) путем компенсации силы тяжести рабочего оборудования машины¹.

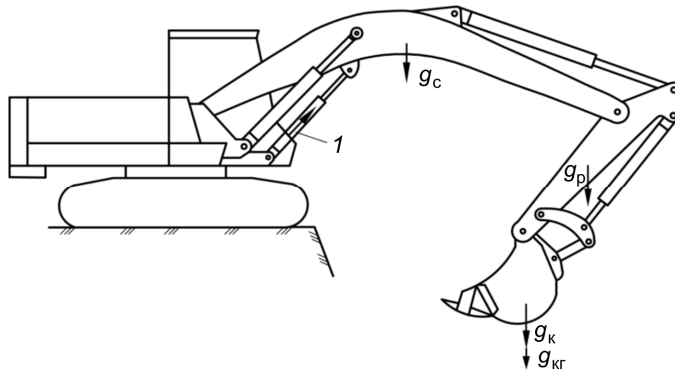


Рис. 8. Общий вид экскаватора с уравнивающим устройством 1 по предложенному способу

Данный метод заключается в последовательном выполнении технологических операций, которые позволяют сосредоточить распределение силы тяжести рабочего оборудования машины на шток уравнивающего цилиндра.

За счет выбора соответствующего объема в устройстве уравнивания обеспечивается стабилизация давления при опускании и подъеме рабочего органа. При пятикратном превышении рабочего объема в газовой полости уравнивающего цилиндра обеспечивается стабилизация давления сжатого воздуха.

Таким образом, в ходе данной работы мы пришли к следующим выводам:

1. Перед выполнением сертификационного испытания устойчивости экскаватора необходимо провести теоретический анализ динамики процесса опрокидывания машины в ключевых для устойчивости положениях.

2. С увеличением мощности двигателя с целью повысить производительность экскаватора увеличиваются скорости рабочих операций и силы инерции, которые стремятся опрокинуть машину.

3. Безопасность и эффективность работы экскаваторов кардинально зависят от способности противодействовать опрокидыванию. Это необходимо принимать во внимание при проектировании машины, а также для подтверждения сертификационных испытаний.

¹ Способ уравнивания сил тяжести рабочего оборудования стреловых машин: пат. 2535846 Рос. Федерация / В.Н. Тарасов, И.В. Бояркина, С.Е. Тарасов. № 2013138546/03; заявл. 19.08.13, опубл. 20.12.14. Бюл. № 35. 9 с.; Рабочее оборудование обратной лопаты гидравлических одноковшовых экскаваторов: пат. 2266371 Рос. Федерация / И.Ф. Хребто, Е.С. Хребто, А.М. Богданов, С.И. Хребто. № 200411754/03; заявл. 08.04.2004, опубл. 20.12.2005. Бюл. № 3. 8 с.; Рабочее оборудование одноковшового гидравлического экскаватора: пат. 2320823 Рос. Федерация / В.Н. Макеев, Д.Д. Плешков. № 2006101432/03; заявл. 18.01.2006, опубл. 27.03.2008. Бюл. № 9. 8 с.

4. Для расчета важное значение имеет положение рабочего оборудования, при котором произошел упор в препятствие: в зависимости от положения меняются плечи, направления и значения сил.

5. Для уменьшения веса рабочего оборудования предпочтительнее использовать моноблочные стрелы по сравнению с составными, поскольку их вес меньше на 15–30 %, что снижает опрокидывающий момент.

6. Использование уравнивающего цилиндра в стреле экскаватора улучшает устойчивость машины и ее КПД рабочего оборудования.

Список литературы

1. Машины для земляных работ: учеб. для вузов / Д.П. Волков, В.Я. Крикун, П.Е. Тоголин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1992. – 448 с.

2. Волков Д.П., Крикун В.Я. Строительные машины: учеб. для сред. проф. обр-я. – М.: АСВ, 2002. – 373 с.

3. Машины для земляных работ: конструкция, расчет, потребительские свойства: в 2 кн. Кн. 1. Экскаваторы и землеройно-транспортные машины: учеб. пособие для вузов / В.И. Баловнев, С.Н. Глаголев, Р.Г. Данилов [и др.]. – Белгород: Изд-во Белгород. гос. техн. ун-та, 2011. – 401 с.

4. Живейнов Н.Н., Карасев Г.Н., Цвей И.Ю. Строительная механика и металлоконструкции строительных и дорожных машин: учеб. для вузов. – М.: Машиностроение, 1988. – 279 с.

5. Холякко А.А., Капралов П.А., Буева А.А. Устойчивость экскаватора // Молодежь и наука: сб. материалов X Юбилейн. всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 80-летию образования Красноярского края. – Красноярск, 2014. – С. 208–209.

6. Машины для земляных работ: учеб. для вузов / А.И. Доценко, Г.Н. Карасев, Г.В. Кустарев [и др.]. – М.: Бастет, 2012. – 688 с.

Получено 25.10.2016

Семенов Артем Владимирович – студент, строительный факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: artem_player@mail.ru.

Вахрушев Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное производство и геотехника», строительный факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: spstf@pstu.ac.ru.