

## АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ АГРЕГАТОВ ПРИ РАБОТЕ НА СКЛОНАХ

Насрединов А.С., к.т.н., Шокирхучаев А.А., ассистент-ТАУ им. Ш. Шотемур

**Ключевые слова:** эрозия, склон, экспозиция, устойчивость, опрокидывание, статический, крен, сползание, динамический, косогорий, планетарный, крутой поворот, центробежный.

С целью предотвращения водной эрозии почвы глубокое рыхление рекомендуется проводить строго поперек склона. Известно, что горные местности характеризуются пересеченным рельефом, где большинство обрабатываемых площадей расположены на склонах, представляющих собой участки различной экспозиции с разными уклонами и большими разностями вертикальных отметок, разбросанностью и небольшими размерами полей, малой длиной гонов, каменностью почв и т.д. Так как сельскохозяйственный агрегат Т – 4А + ГУ – 2,1 предназначен для выполнения технологического процесса по ровной местности, то при применении, его в условиях пересеченной местности вопросы устойчивости и маневренности агрегата приобретают важное значение.

По имеющимся данным около 70 % всех несчастных случаев, происходящих в горной местности, являются случаями опрокидывания, которое в основном происходит с навесным агрегатом при выглубленных рабочих органах [1].

Причинами опрокидывания могут быть:

- большой крен вследствие сползания гусениц с последующим боковым опрокидыванием в результате динамического упора;
- попадание гусениц в углубление;
- наезд на неровности;
- опрокидывание в момент выглубления рыхлителя при повороте;
- крутой поворот или переезд трактора с навешанным глубокорыхлителем на косогоре;
- недостаточная устойчивость агрегата в результате действия инерционных сил;
- потеря управления и др.

Одной из целей настоящих исследований было определение оптимального угла склона, где можно было бы использовать навесной почвообрабатывающий агрегат без опасения опрокидывания. Для этого введем такие понятия, как «предельный статический угол уклона» и «предельный динамический угол уклона» [1,2].

На рис. 1. показан агрегат с навесной машиной при выглубленных рабочих органах, находящейся поперек склона с углом уклона  $\alpha$ . Пусть  $\alpha_n$  – угол поперечного уклона, на котором агрегат начинает опрокидываться. Значение угла  $\alpha_n$  можно определить из условия, что опрокидывание начнется, когда нормальная реакция  $Z''$  почвы на гусеницу, расположенную в верхней, относительно вертикальной оси агрегата, части уклона будет равна нулю. При этом возможной осью опрокидывания является нижний край левой гусеницы трактора и равенство моментов сил относительно этой оси можно выразить:

$$G'_A \cdot h_{ц.т} - G''_A \cdot \frac{B+b_r}{2} = 0, \quad (1)$$

где,  $G'_A = G_A \cdot \sin\alpha$ ;  $G''_A = G_A \cdot \cos\alpha$ ;

$G_A$  – вес (масса) агрегата,

$h_{ц.т}$  – высота расположения центра тяжести агрегата от поверхности поля;

$B$  – колея трактора;  $b_r$  – ширина гусеницы трактора.

Подставляя значения  $G'_A$  и  $G''_A$  в формулу (1) и проведя некоторые преобразования, получим:

$$G_A \cdot \sin\alpha \cdot h_{ц.т} = \frac{B+b_r}{2 \cdot h_{ц.т}} \cdot G_A \cdot \cos\alpha, \text{ или } \operatorname{tg}\alpha = \frac{B+b_r}{2 \cdot h_{ц.т}}.$$

Заменяя угол склона  $\alpha$  на предельный статический угол уклона  $\alpha_n$  получим:

$$\operatorname{tg}\alpha_n = \frac{B+b_r}{2 \cdot h_{ц.т}}. \quad (2)$$

Формула (2) выведена с учетом того, что центр тяжести агрегата находится в продольной плоскости симметрии гусениц трактора. Как видно из этой формулы, чем ниже высота центра тяжести и больше колея или ширина гусениц, тем больше значение предельного статического угла  $\alpha_n$  уклона и агрегат может работать на более крутых склонах.

Вверху было указано на то, что одной из основных причин опрокидывания агрегата является его большой крен вследствие сползания гусениц с последующим динамическим ударом. Поэтому определение статического угла  $\alpha_\mu$  уклона, при котором возможно сползание агрегата, имеет большое значение. Для этого составим уравнение проекций всех сил, действующих на агрегат, на ось  $Y$  (рис.1), т.е. на ось, параллельную поверхности поля:

$$G'_A = Y' + Y'' \text{ или } G_A \cdot \sin\alpha = y' + y'' \quad (3)$$

где,  $y'$  и  $y''$  – боковые составляющие реакции поля, соответствующие с нормальными

составляющими  $z'$  и  $z''$ .

$$y' = \mu_y \cdot z' \text{ и } y'' = \mu_y \cdot z'',$$

$\mu_y$  - коэффициент сцепления движителей с почвой в боковом направлении.

Тогда уравнение (3) примет вид:

$$G_A \cdot \sin \alpha = \mu_y (z' + z'') \quad (4)$$

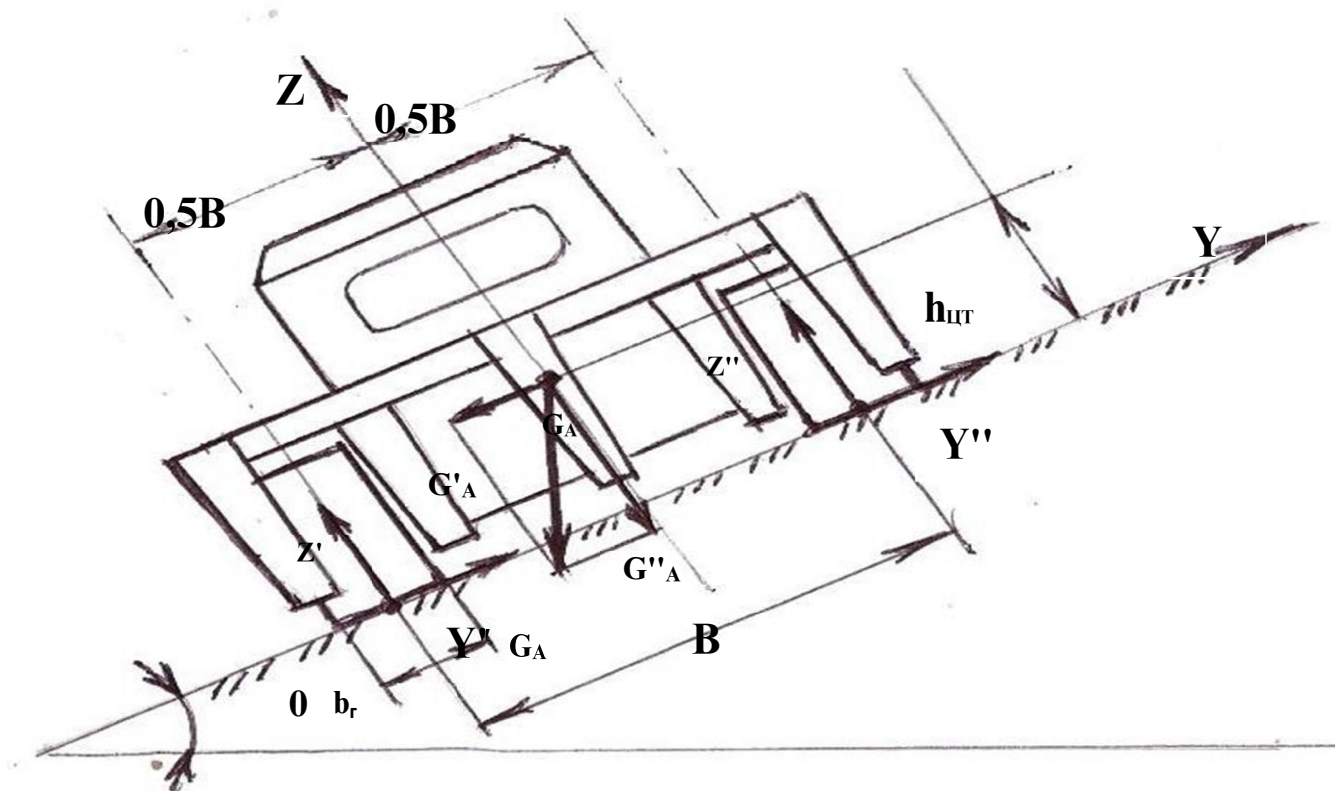
Из уравнения проекций сил на ось  $Z$  имеем

$$G''_A = G_A \cdot \cos \alpha = z' + z'' \quad (5)$$

Разделив (4) на (5) и заменив, угол склона  $\alpha$  на статический угол  $\alpha_\mu$ , при котором возможно сползание агрегата, получим

$$\operatorname{tg} \alpha_\mu = \mu_y. \quad (6)$$

Следовательно, статический угол, при котором возможно сползание агрегата зависит от физико-математических свойств поверхности поля и конструкции движителей.



**Рис. 1. К определению статической устойчивости навесного сельскохозяйственного агрегата на склоне.**

Значения углов и определяют поперечную статическую устойчивость навесного агрегата. Многочисленными исследованиями установлено, что значения этих углов для гусеничных тракторов колеблются в пределах  $40 - 50^0$  [2,3]. Однако при движении навесного агрегата на косогоре (поперек склона) появляются возмущающие факторы, способствующие к опрокидыванию.

Поэтому для определения предельного угла уклона, при котором сельскохозяйственный навесной агрегат может двигаться без опасения опрокидывания, необходимо учитывать динамические факторы. Известно, что на поперечную устойчивость навесного агрегата при криволинейном движении (на повороте) существенное влияние оказывают возникающие при этом инерционные силы.

Рассмотрим случай поворота навесного сельскохозяйственного агрегата с гусеничным трактором при движении его на склоне. Обычно поворот гусеничного трактора происходит в результате подвода к ведущим звездочкам разности моментов. У тракторов

$T - 4A$  эта разность достигается при помощи шестеренчатых планетарных механизмов с тормозами. При этом поворот может быть крутым (поворот на месте) и плавным. Однако при работе навесного агрегата на склонах производить крутой поворот не рекомендуется, так как навешанный сзади (или спереди) трактора сельскохозяйственная машина, создавая большую инерционную силу, способствует опрокидыванию агрегата [3].

Сущность кинематики поворота при плавном его осуществлении заключается в следующем. Современные гусеничные трактора, и  $T - 4A$  в том числе, оборудованы механизмами поворота, принцип действия которых основан на регулировании скоростей перематывания гусениц по ободу, т.е. давая гусеницам разные скорости. При этом трактор поворачивается вокруг некоторой точки  $O$  (рис. 2),

называемой центром поворота. Доказано, что эта точка всегда лежит в поперечной плоскости, проходящей через середины опорных поверхностей гусениц совпадают с геометрическими центрами  $O_1$  и  $O_2$  [4]. Поворот гусеничного трактора также характеризуется угловой скоростью  $\omega_n$  и радиусом поворота (рис. 2).

При повороте сельскохозяйственного навесного агрегата возникает центробежная сила  $P_{ц}$ , приложенная к центру тяжести агрегата и направленная по радиусу  $R_{ц,т}$  от центра поворота. Она определяется по формуле

$$P_{ц} = m \cdot \omega_n^2 R_{ц,т} \cdot \cos \alpha, \text{ где } m = \frac{G_A}{g} - \text{масса агрегата, кг.}$$

Разложив силу  $P_{ц}$  на две составляющие, действующие в продольной ( $P'_{ц}$ ) и поперечной ( $P''_{ц}$ ) плоскостях агрегата, выясним, что только сила  $P''_{ц}$  стремится опрокинуть агрегат на бок. Эта сила равна:

$$P''_{ц} = P_{ц} \cdot \cos \gamma_{ц} = m \cdot \omega_n^2 R_{ц,т} \cdot \cos \gamma_{ц} \cdot \cos \alpha, \quad (7)$$

где,  $\gamma_{ц}$  - угол наклона центробежной силы  $P_{ц}$  к поперечной плоскости.

Так как  $R_{ц,т} \cdot \cos \gamma_{ц} = R$  и  $m = \frac{V}{R}$ , то подставив эти значения в (7), имеем:

$$P''_{ц} = m \cdot \frac{V^2}{R^2} \cdot R \cdot \cos \alpha = \frac{m \cdot V^2 \cdot \cos \alpha}{R} = \frac{G_A \cdot V^2}{g \cdot R} \cdot \cos \alpha, \quad (8)$$

Как видно из формулы (8) с увеличением скорости и уменьшением радиуса поворота центробежная сила резка возрастает. Необходимо отметить, что к этой силе прибавляется или отнимается боковая составляющая силы тяжести агрегата и ( $G_A \sin \alpha$ ) в зависимости от того в какую сторону (вверх по склону или вниз) поворачивается агрегат. В начале поворота, т.е. при переходе от прямолинейного движения к установившемуся криволинейному с постоянным радиусом кривизны, кроме указанных выше сил, появляются другие инерционные силы. Для поперечной устойчивости имеет значение то обстоятельство, что в это время (т.е. при входе агрегата в повороте) происходит относительное вращения центр тяжести агрегата вокруг точки  $O'$  (рис.2) с тангенциальным ускорением  $a_{of} = r \cdot \epsilon$ .

$\epsilon = \frac{d\omega_n}{dt}$  - изменение угловой скорости поворота  $\omega_n$

$r$  - расстояние от точки  $O'$  до центра тяжести агрегата.

В результате этого возникает тангенциальная сила  $P_t$  инерции, приложенная к центру тяжести агрегата и действующая в том же направлении, что и сила  $P''_{ц}$ . Она определяется по формуле:

$$P_t = m \cdot r \cdot \epsilon = \frac{G_A}{g} \cdot r \cdot \frac{d\omega_n}{dt}, \quad (9)$$

По формуле (9) видно, что тангенциальная сила при прочих равных условиях зависит в  $\frac{d\omega_n}{dt}$  основном от ускорения  $\epsilon = \frac{d\omega_n}{dt}$ , т.е. от резкости поворота.

Следовательно, для рассматриваемых условий общая поперечная сила  $P_{он}$ , стремящаяся нарушить устойчивость навесного агрегата, равно:

$$P_{он} = P''_{ц} + P_t + G'_A = \frac{G_A \cdot V^2}{g \cdot R} \cdot \cos \alpha + \frac{G_A \cdot r}{g} \cdot \frac{d\omega_n}{dt} \cdot \cos \alpha \pm G_A \cdot \sin \alpha = \\ = \frac{G_A}{g} \left( \frac{V^2}{R} \cdot \cos \alpha + r \cdot \frac{d\omega_n}{dt} \cdot \cos \alpha \pm g \cdot \sin \alpha \right), \quad (10)$$

Как видно из формулы (10) резкий поворот ( $\epsilon$ ) при большой скорости ( $V$ ) и малом радиусе поворота ( $R$ ) может привести к значительному увеличению опрокидывающей силы  $P_{он}$ , т.е. от резкости поворота.

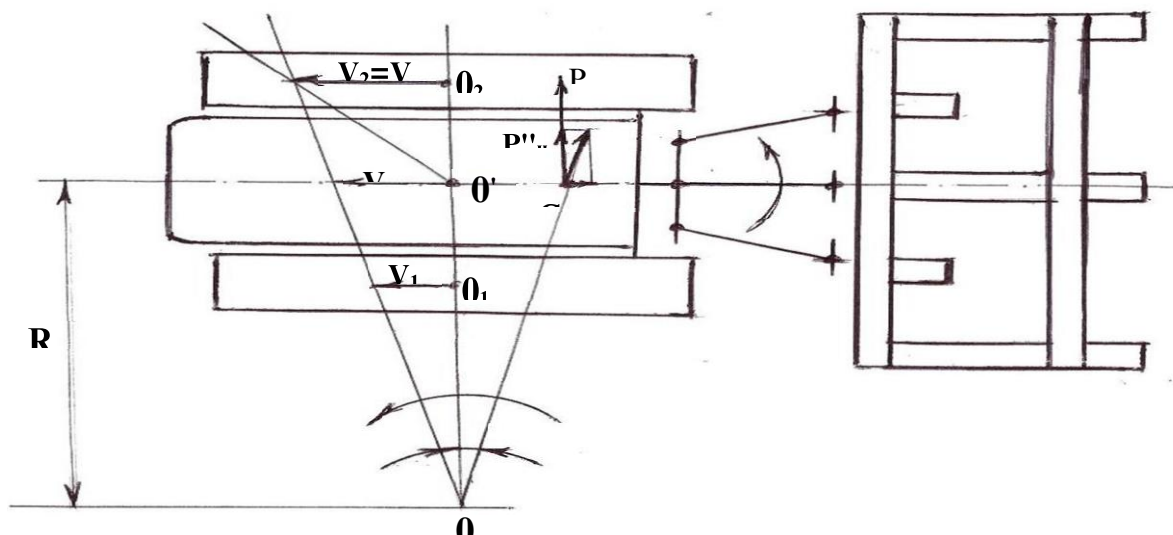


Рис. 2. - Кинематические и динамические характеристики навесного сельскохозяйственного агрегата при

### работе на склонах.

Условимся, что суммарная опрокидывающая сила  $P_{он}$  приложена к центру тяжести, агрегата и действует в поперечной плоскости. Тогда условие сохранения устойчивого движения навесного агрегата при повороте имеет вид:

$$P_{он} \cdot h_{ц.т} \leq G''_A \cdot \frac{B+b_r}{2}$$

или

$$\frac{G_A}{g} \left( \frac{v^2}{R} \cdot \cos\alpha + r \cdot \frac{d\omega_n}{dt} \cdot \cos\alpha \pm g \cdot \sin\alpha \right) \cdot h_{ц.т} \leq G_A \cdot \frac{B+b_r}{2} \cdot \cos\alpha,$$

или

$$\frac{v^2}{R} \cdot \cos\alpha \leq g \cdot \frac{B+b_r}{2 \cdot h_{ц.т}} \cdot \cos\alpha - r \cdot \frac{d\omega_n}{dt} \cdot \cos\alpha \pm g \cdot \sin\alpha,$$

откуда

$$v \leq \sqrt{g R \left( \frac{B+b_r}{2 \cdot h_{ц.т}} - \frac{r}{g} \cdot \varepsilon_n \pm tg \alpha \right)}, \quad (11)$$

Где  $\varepsilon = \frac{d\omega_n}{dt}$  - угловое ускорение агрегата в начале поворота.

При заданных параметрах предельный угол склона, где агрегат может поворачиваться без опасения опрокидывания:

$$tg \alpha'_n = \frac{B+b_r}{2 \cdot h_{ц.т}} - \frac{1}{g} \cdot \left( \frac{v^2}{R} + r \cdot \varepsilon_n \right), \quad (12)$$

Выводы:

1. При оценке и прогнозировании эффективности технологических процессов и технологий производства сельскохозяйственной продукции следует учитывать случайный характер изменения энергоемкости технологических процессов, обусловленных колебанием скоростных и нагрузочных режимов работы агрегатов.

2. При эксплуатации техники на склоновых землях следует учитывать, что чем больше скорость движения агрегата и меньше радиус его поворота, тем меньше предельный угол склона, где агрегат может поворачиваться без опасения опрокидывания.

3. Установлена формула (12) для определения предельного угла  $\alpha'_n$  склона, где агрегат может поворачиваться без опасения опрокидывания и можно определить значения опрокидывающей силы  $P_{онот}$  крутизны склона.

4. При обосновании оптимальных параметров и режимов работы сельскохозяйственных агрегатов, оптимизации топливо - энергетических затрат следует учитывать поправочные коэффициенты на рельеф местности, высоты над уровнем моря, конфигурации полей и т.д. При этом в качестве критерия оптимизации целесообразно использовать минимумы вероятностных оценок энергоемкости технологических процессов.

Рассмотренные выше теоретические положения в дальнейшем можно использовать при составлении и обоснованию структуры топливо - энергетических затрат на производство сельскохозяйственной продукции в долинной и горной зонах, а также в условиях обеспеченных осадками богарных землях Таджикистана.

### Литература

1. Агеев Л. Е. Основы расчета оптимальных и допускаемых режимов работы машино - тракторных агрегатов - Л.: Колос, 1978. - 296 с.
2. Джабборов Н.И., Насрединов А.С., Сайфов Н.Д. Энергетическая эффективность глубокого рыхления почвы под хлопчатник и зерновые культуры // Информ. листок НПИ Центра Респ. Таджикистан, №91 - 99, серия 68. 85 - Душанбе, 1999. - 4с.
3. Джабборов Н.И. Научные основы энерготехнологической оценки и прогнозирования эффективности использования мобильных сельскохозяйственных агрегатов - Душанбе: Дониш, 1995. - 286с.
4. Лурье А. Б. Статическая динамика сельскохозяйственных агрегатов - Л.: Колос, 1970. - 376 с.
5. Леонов И.В., Хучуа В.Р. Динамическая устойчивость трактора при работе на склоне. // Тракторы и сельхозмашины, 1986. - №1. - С. 27 - 28.
6. Огансин К.Г. Исследование работы картофелесажалок в горных условиях // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1981. - №5. - С. 6 - 8.
7. Пшеченков К. А., Верещагин Н.И. Индустриальная технология производства картофеля - М.: Колос, 1985. - 153с.
8. Скотников В. А., Мещерский А. А., Солонский А. С. Основы теории и расчета, трактора и автомобиля - М.: Агропромиздат, 1986. - 383 с.
9. Чудаков Д. А. Основы теории и расчета трактора и автомобиля - М.: Колос, 1972. - 384 с.
10. Тағоймуродов А. Т., Хамдамов Г. Х. Механизация возделывания картофеля. // Обз инф. - Душанбе, 2003. - 48 с.
11. Тағоймуродов А.Т. Повышение эффективности технологии производства картофеля путем

рационального использования топлива – энергетических ресурсов в условиях республики Таджикистан // Автореф. дисс. канд. техн. наук, С.Пб – Пушкин, С.ПбГАУ, 2003, – 17с.

12. Насрединов А.С. Повышение энергетической эффективности производства пшеницы путём рационального использования средств механизации в условиях Гиссарской долины Таджикистана// Автореф. дисс. канд. техн. наук, С.Пб – Пушкин, С.Пб ГАУ, 2002. – 21 с.
13. Хамдамов Г.Х. К оценке устойчивости работы сельскохозяйственных агрегатов на склоновых землях// Доклады Таджикской академии сельскохозяйственных наук. №3 – 4. – Душанбе, 2003. – С.78 – 81.

#### АННОТАЦИЯ

#### ТАҲЛИЛИ УСТУВОРИИ ТҶҶЛИИ АГРЕГАТҶҶОИ КИШОВАРЗӢ ДАР ҶҶЛАТИ КОРӢ ДАР НИШЕБИҶҶО(ШАРОИТИ КӶҶСОР)

Дар мақола таҳлили сабабҳои чапшавии агрегатҳои кишоварзии дар шароити кӯҳсор (талу теппаҳо) коркунанда ва роҳи пешгирии он оварда шудааст. Моделҳои математикии муайян намудани кунҷи оптималие, ки агрегат бе хатари чапшавӣ кор менамояд ва кувваи арзие, ки ба чапшавӣ мусоидат менамояд, пешниҳод шудааст. Ин имконият медиҳад, ки суръати оптималии ҳаракат ва радиуси гардиши агрегатро дар вақти кор дар шароити кӯҳсор муайян намоем.

#### АННОТАЦИЯ

#### АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ АГРЕГАТОВ ПРИ РАБОТЕ НА СКЛОНАХ

В статье приведен подробный анализ причин опрокидывания сельскохозяйственных агрегатов при работе в горных условиях (склонах) и пути их предотвращения

Предложены математические модели определения оптимального угла склона и поперечной силы, способствующих опрокидыванию, в котором агрегат может работать без опасения опрокидывания.

Это позволяет определить оптимальную скорость движения и радиуса поворота агрегата при работе в горных условиях (на склоновых землях).

#### ANNOTATION

#### ANALYSIS OF TRANSVERSE STABILITY OF AGRICULTURAL UNITS WHEN WORKING ON SLOPES

The article presents the reasons for the overturning of agricultural units when working in the mountains (slopes) and ways to prevent them.

Mathematical models for determining the optimal slope angle and transverse force, contributing to the rollover, in which the unit can operate without fear of rollover, are proposed.

This makes it possible to determine the optimal speed and turning radius of the unit when working in mountainous conditions (in sloping lands).

**Keywords:** erosion, slope, exposure, stability, overturning, static, roll, sliding, dynamic, slope, planetary, sharp centrifugal turn.