

ния; форма потери устойчивости и критический параметр нагрузки (ФАКТ) представлены на рис. 7.

Следует помнить, что для использования полученного решения в практике проектирования необходимо внести поправки, учитывающие возможные начальные несовершенства формы.

Таким образом, использование программы ANSYS позволило определить несущую способность корпуса головного обтекателя с учетом всех существующих особенностей его конструкции, в том числе оценить влияние параметров продольного стыка и взаимодействие соседних отсеков на форму потери устойчивости и величину критической нагрузки.

1. Лизин В. Т., Пяткин В. А. Проектирование тонкостенных конструкций. — М.: Машиностроение, 1976. — 407 с.
2. Мяченков В. И., Олышанская Г. Н., Чеканин А. В. Автоматизация конструирования и прочностных расчетов тонкостенных осесимметричных конструкций. КИПР-IBM-PC/AT 2.0. — М.: МГТУ «СТАНКИН», 1994.
3. ANSYS user's Manual for Revision 5.0. — Swanson Analysis

Systems, Inc., 1994. — Vol. I. Procedures DN-R300:50-1; — Vol. II. Commands DN-R300:50-2; — Vol. III. Elements DN-R300:50-3; — Vol. IV. Theory DN-R300:50-4.

4. Examples supplement for Revision 5.0A. — Swanson Analysis Systems, Inc., 1994.

#### ON ELASTIC STABILITY OF THREE LAYER PAYLOAD FAIRING WITH DISCRETE LONGITUDINAL LINKS FOR LAUNCH VEHICLE

T. P. Artyukhova

The problem of elastic stability herein for payload aerodynamic fairing of a composite material with discrete longitudinal connections loaded under external excessive pressure is presented. The calculation of parameters of critical external pressure was performed by method of finite element. The forms of loss of stability and values of critical load were determined as a result of calculations for various cases of loading and various parameters of longitudinal joint. The estimation of influence of parameters of the longitudinal joint (number of discrete links, stiffness of the longitudinal beams) on the critical external pressure value was carried out.

УДК 62-251-755:681.5

## ЖИДКОСТНОЕ БАЛАНСИРОВОЧНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ СТАТИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ ПРИ ПОСТОЯННОМ КОНЕЧНОМ РАСХОДЕ ЖИДКОСТИ, ТОЧНОСТЬ БАЛАНСИРОВКИ

© А. Ю. Животов

Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля

Представлено рідинний автоматичний балансувальний пристрій неперервної дії, який доцільно використовувати для наземних випробувань ракетно-космічної техніки. Він може знайти широке застосування в аерокосмічній, суднобудівній та автомобільній промисловості. Розглянуто векторну діаграму балансування валу за допомогою автобалансирувального пристрою для статичного балансування при постійній кінцевій витраті рідини; визначена точність АБП.

### ЖИДКОСТНОЕ АВТОБАЛАНСИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ СТАТИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ ВЕРТИКАЛЬНОГО РОТОРА НА ГИБКОМ ВАЛУ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ УПРУГИМИ РАСТЯЖКАМИ

Конструкции современных летательных аппаратов, двигателей, экспериментальных стендов, стартовых комплексов, невозможно представить без большого количества вращающихся деталей. Это, как правило, валы двигателей, турбин, рулевых машинок, оси гироскопов, экспериментальных стендов, в частности центрифуг для определения остатков незабора компонентов ракетного топлива из баков окис-

лителя и горючего.

В результате погрешности установки, неоднородности материала, жестких условий эксплуатации при вращении вала могут возникать нежелательные, а порой опасные для конструкции явления вибрации. Вибрация приводит к резонансу, способному разрушить конструкцию летательного аппарата или грозящему потерей устойчивости при полете. Очевидно, что вал должен быть сбалансированным. Балансировать вал следует до его установки на конструкцию, а в некоторых случаях, например из-за постоянно изменяющейся массы, — и в процессе работы.

Для постоянной балансировки предложено жидкостное балансирующее устройство непрерывного действия. Отсутствие подвижных и трущихся частей, высокая надежность и точность работы обусловила выбор жидкостного балансирующего устройства.

Жидкостное автобалансирующее устройство содержит распределительную камеру 4, установленную в плоскости  $U_1$  измерения дисбаланса соосно оси  $Z$  ротора 1 (рис. 1). Распределительная камера 4 представляет собой цилиндрическую емкость 5 с центральным отверстием 6 и отводными патрубками 7а—е. Входы в отводные патрубки равноудалены от оси  $Z$  вала 2 и расположены внутри цилиндрической емкости 5 с образованием кольцевого проточного канала, дном которого является внутренняя боковая поверхность цилиндрической емкости 5. При помощи трубопроводов 10а—е отводные патрубки 7 соединены с резервуарами 8а—е. Резервуары 8 установлены в плоскости коррекции  $K_1$ , равномерно распределены по окружности на равном удалении от оси  $Z$  ротора и снабжены сливными отверстиями 9. Угол раствора между двумя соседними резервуарами 8 равен  $\varphi = 360^\circ/n$ , где  $n$  — число резервуаров 8. Число резервуаров соответствует числу отводных патрубков, распределенных по окружности, угол раствора между которыми также равен  $\varphi$ . Резервуары 8 смещены относительно отводных патрубков 7 на угол  $\beta$  смещения резервуаров, равный  $20^\circ$ . Положительное направление противоположно вращению ротора 1. На виде спереди (рис. 1) распределительная камера 4 повернута против вращения ротора 1 на угол  $20^\circ$ . Подвод жидкости к распределительной камере 4 осуществляется через центральное отверстие 6 при помощи насадка 12, связанного с источником 11 трубопроводом 13 с нормально закрытым клапаном 14. Клапан 14 управляется датчиком 15 вибраций, установленным на упругой растяжке 3.

Срабатывание клапана 14 предусмотрено при наличии подтверждающего сигнала от датчика вибраций 15. Для пополнения запасов жидкости в источнике 11 предусмотрен кран 16 центральной системы водоснабжения. Для слива жидкости самотеком из автобалансирующего устройства после остановки ротора предусмотрены дренажные отверстия 9 в резервуарах 8 и сливная трубка 17.

Если ротор 1 статически неуравновешен, то при вращении датчик 15 вибрации выдает команду на открытие клапана 14, и жидкость от источника подводится в распределительную камеру 4. Под действием центробежных сил жидкость занимает положение, при котором ее свободная поверхность коаксиальна оси  $Z'$  вращения ротора 1. При нали-

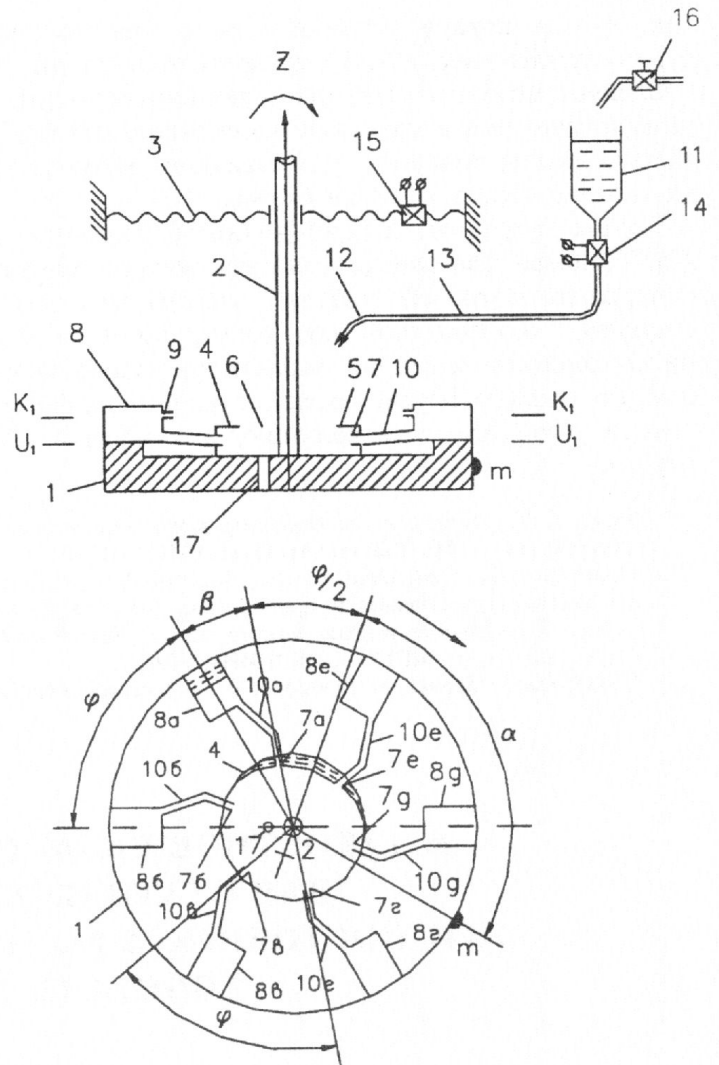


Рис. 1. Жидкостное автобалансирующее устройство для статической балансировки ротора

тии смещения осей  $Z$  и  $Z'$  наиболее удаленный от оси  $Z'$  вращения отводной патрубков 7 оказывается под уровнем жидкости, и через него жидкость по трубопроводу 10 направляется в соответствующий резервуар 8. Если накопление жидкости в резервуаре 8 приводит к уменьшению дисбаланса ротора, то происходит балансировка. Описанное АБУ способно производить балансировку и подбалансировку ротора 1 до заполнения жидкостью одного из резервуаров. Для разовой балансировки ротора 1 достаточно после начала вращения открыть клапан 14 и слить жидкость из источника. Излишек жидкости источника распределится по резервуарам 8, не нарушая достигнутой точности балансировки, или будет сброшен через дренажные отверстия 9. В этом случае надобность в датчике вибрации 15 отпадает. Такие устройства применимы в тех случаях, когда ротор плоский, и влияние моментной неуравновешенности незначительно.

# ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА БАЛАНСИРОВКИ РОТОРА С ПОМОЩЬЮ АВТОБАЛАНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ СТАТИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ ПРИ ПОСТОЯННОМ КОНЕЧНОМ РАСХОДЕ ЖИДКОСТИ

На практике расход жидкости является конкретной величиной, и это определенным образом влияет на балансировку ротора. При непрерывном подводе жидкости к распределительной камере с конечным расходом жидкости в балансировке участвует некоторый объем жидкости, приводящий к излишнему внесению корректирующих масс в резервуары в момент изменения направления дисбаланса корректирующих масс. Излишнее внесение корректирующих масс особенно сказывается на этапе завершения балансировки, что отражается в первую очередь на точности балансировки. Особенности балансировки ротора при конечном расходе жидкости можно пояснить с помощью описанного АБУ. Пусть жидкость поступает в резервуар 8а. Вначале жидкость заполняет трубопровод 10а, затем движется вдоль стенок и только после этого достигает днища резервуара 8а. Накопление заторможенной жидкости в резервуаре 8а вызывает силовое воздействие, приводящее к балансировке ротора. Когда остаточный дисбаланс ротора совпадает с линией узлов изменения ввода корректирующих масс, жидкость начнет поступать в следующий резервуар 8б. На заполнение трубопровода 10б и стекание жидкости по стенкам резервуара 8б до днища резервуара понадобится определенное время. За это время жидкость, находящаяся в автобалансирующем устройстве на участке от отводного патрубка 7а до уровня жидкости в резервуаре 8а, сольется и создаст излишние корректирующие массы, дисбаланс которых назовем остаточным дисбалансом корректирующих масс резервуара. В остальном балансировка ротора не отличается от описанной при бесконечно малом расходе жидкости. Векторная диаграмма балансировки (рис. 2) построена для АБУ, содержащего шесть резервуаров, положение одного из которых задано в системе координат  $OXY$  углом  $\lambda_1$  при  $\alpha + \beta = 105^\circ$ . Положение массы  $m$ , создающей неуравновешенность ротора, и направление дисбаланса ротора в системе координат  $OXY$  определено углом  $\delta$ . Вектор  $OA$  характеризует дисбаланс ротора по величине и направлению. Узлы изменений направления дисбаланса корректирующих масс обозначены точками  $A_1, A_2, A_3$ . Точками  $B_1, B_2, B_3, \dots$  обозначены мнимые узлы изменения направления дисбаланса корректирующих масс.  $C_1, C_2, C_3$  являются точками пересечения продолжения линий  $OA_1$  и  $B_1A_2$ ,  $OA_2$  и  $B_2A_3$ ,  $OA_3$  и  $B_3A_4$ ... Векторы  $AA_1, B_1A_2, B_2A_3, B_3A_4$  характеризуют

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ. ДОДАТОК.—2001.—7, № 1

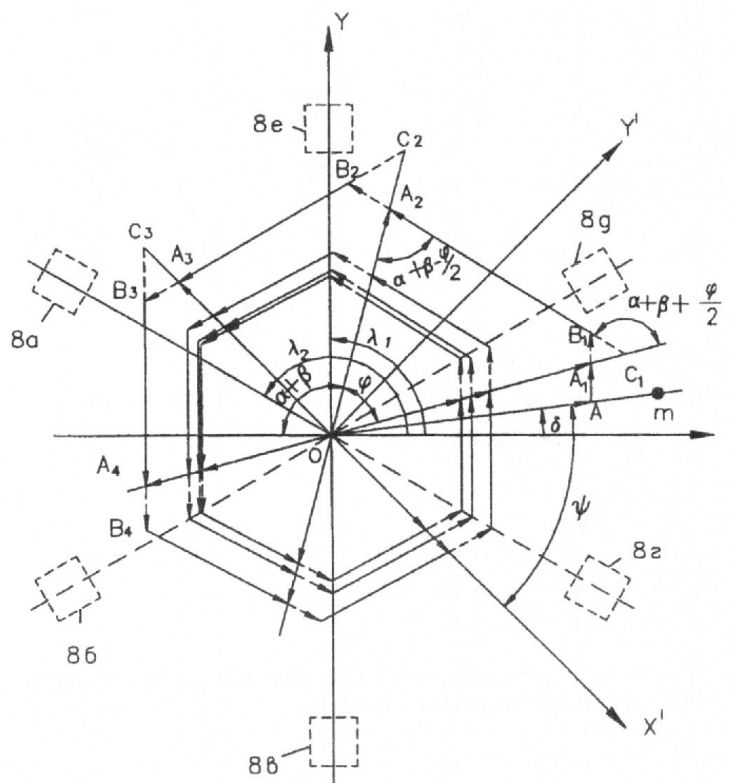


Рис. 2. Векторная диаграмма балансировки ротора с помощью автобалансирующего устройства при конечном расходе жидкости

ют дисбалансы корректирующих масс, создаваемых заполнением резервуаров жидкостью до момента начала ввода жидкости в следующий резервуар. Векторы  $A_1B_1, A_2B_2, A_3B_3, \dots$  характеризуют слив остатков жидкости в предыдущие резервуары. Векторы  $OA_1, OA_2, OA_3$  являются остаточными дисбалансами ротора. Векторная диаграмма показывает, что при сливе остатков жидкости узлы изменения дисбаланса корректирующих масс из точек  $A_1, A_2, A_3, \dots$  как бы переходят в точки  $B_1, B_2, B_3, \dots$  — мнимые узлы изменения направления дисбаланса корректирующих масс.

Углы между векторами  $OA_1$  и  $OA_2$ ,  $OA_2$  и  $OA_3$ ,  $OA_3$  и  $OA_4, \dots$  равны  $\psi$ . Углы между векторами  $B_1A_2$  и  $OA_2$ ,  $B_2A_3$  и  $OA_3, \dots$  по-прежнему равны  $\alpha + \beta - \varphi/2$ , так же, как углы между векторами  $OA_1$  и  $B_1A_2$ ,  $OA_2$  и  $B_2A_3$ ,  $OA_3$  и  $B_3A_4$  равны  $\alpha + \beta - \varphi/2$ .

Линии узлов изменения направления дисбаланса корректирующих масс образуют с вектором прогиба оси ротора, повернутым на угол  $\beta$ , углы, равные  $\alpha + \beta$ .

Векторная диаграмма балансировки при  $180^\circ + \varphi/2 < \alpha + \beta < 270^\circ$  не приводится, так как отличается лишь направлением действия дисбалан-



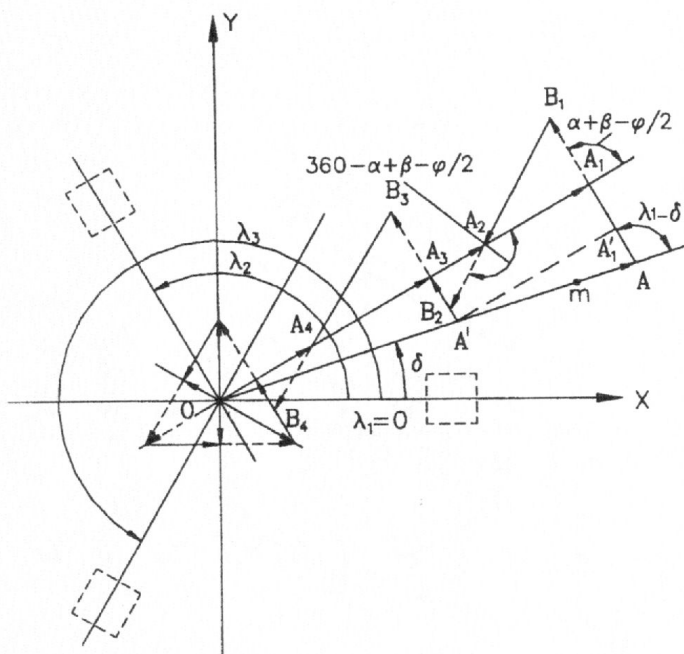


Рис. 3. Векторная диаграмма балансировки ротора с помощью АБУ при конечном расходе жидкости

сов корректирующих масс и обратной очередностью заполнения резервуаров жидкостью.

Векторная диаграмма балансировки ротора в диапазоне  $180^\circ - \varphi/2 \leq \alpha + \beta \leq 180^\circ + \varphi/2$  показана для автобалансирующего устройства, содержащего три резервуара, связанных с системой координат  $OXY$  углом  $\lambda_1 = 0$  при  $\alpha + \beta = 150^\circ$  (рис. 3). Положение массы  $m$ , создающей неуравновешенность, и следовательно, направление дисбаланса ротора в системе координат  $OXY$ , определено углом  $\delta$ . Векторы  $\vec{AA}_1$  и  $\vec{B}_2\vec{A}_3...$  характеризуют дисбалансы корректирующих масс, вносимых в резервуар, угловое положение которого определено углом  $\lambda_2$ . Слив остатков жидкости в этот же резервуар характеризуют векторы  $\vec{A}_1\vec{B}_1$ ,  $\vec{A}_3\vec{B}_3$ ,  $\vec{A}_5\vec{B}_5...$  Векторы  $\vec{B}_1\vec{A}_2$ ,  $\vec{B}_3\vec{A}_4$  характеризуют дисбалансы корректирующих масс, вносимых при балансировке путем подвода жидкости в следующий резервуар. Слив остатков жидкости в этот же резервуар характеризуется векторами  $\vec{A}_2\vec{B}_2$ ,  $\vec{A}_4\vec{B}_4...$  Векторы  $\vec{OA}_1$ ,  $\vec{OA}_2$ ,  $\vec{OA}_3$  характеризуют остаточные дисбалансы ротора. Угол между векторами  $\vec{AA}_1$  и  $\vec{OA}_1$ ,  $\vec{B}_2\vec{A}_3...$  равен  $\alpha + \beta - \varphi/2$ .

Угол между векторами  $\vec{OA}_2$  и  $B_1A_2$ ,  $\vec{OA}_4$ ,  $B_3A_4...$  равен  $360^\circ - \alpha - \beta - \varphi/2$ . Угол между линией узлов  $A_1, A_2, A_3...$  изменения направления дисбаланса корректирующих масс и направлением прогиба оси ротора, повернутым на угол  $\beta$ , равен  $\alpha + \beta$ .  $B_1, B_2, B_3, B_4...$  являются мнимыми узлами изменения

направления дисбаланса корректирующих масс. Векторная диаграмма показывает, что в начале балансировки жидкость попеременно поступает только в два резервуара, но на этапе завершения балансировки создаются условия для последовательного поступления жидкости во все три резервуара, и процесс балансировки подобен процессу, изображенному на рис. 2. Необходимо подчеркнуть, что ни один из процессов, представленный на векторных диаграммах, не вносит особенностей, которые привели бы к изменению области работоспособности АБУ, так как этими особенностями можно пренебречь в случае, если начальный дисбаланс ротора значительно превышает остаточный дисбаланс корректирующих масс резервуара.

### ТОЧНОСТЬ АВТОБАЛАНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ПРИ ПОСТОЯННОМ КОНЕЧНОМ РАСХОДЕ ЖИДКОСТИ

Процессу балансировки присущее постепенное неу-  
клонное уменьшение остаточных дисбалансов рото-  
ра, направление которых совпадает с линией узлов  
изменения направления дисбаланса корректирую-  
щих масс резервуаров. Начиная с некоторого мо-  
мента, уменьшение остаточных дисбалансов пре-  
кращается, так как остаточный дисбаланс коррек-  
тирующих масс, вызванный сливом остатков жид-  
кости в резервуар, приводит к увеличению остаточ-  
ных дисбалансов ротора, не совпадающих с линией  
узлов изменения направления дисбалансов коррек-  
тирующих масс. Такой момент наступает, когда  
угол между векторами  $\vec{OA}_i$  и  $\vec{OB}_i$  становится рав-  
ным  $\alpha + \beta = 90^\circ$ , а угол между векторами  $\vec{A_iB_i}$  и  
 $\vec{OB_i}$  становится равным углу между вектором  $\vec{OB_i}$  и  
направлением, противоположным направлению  
вектора  $\vec{B_iA_{i+1}}$ . Обозначив значения остаточного  
дисбаланса корректирующих масс резервуара через  
 $a$ , а максимальное значение неустранимого оста-  
точного дисбаланса ротора через  $b$ , из треугольника  
 $OA_iB_i$  получим при  $90^\circ < \alpha + \beta \leq 180^\circ$

$$b = -a \frac{\sin(\alpha + \beta - \varphi/2)}{\cos(\alpha + \beta)}.$$

Очевидно, что в диапазоне  $180^\circ \leq \alpha + \beta < 270^\circ$

$$b = a \frac{\sin(\alpha + \beta - \varphi/2)}{\cos(\alpha + \beta)}.$$

Значение остаточного дисбаланса определяет точность АБУ, обусловленную его возможностями. Ее следует отличать от точности балансировки ротора с помощью АБУ, которая зависит от точности установки АБУ на роторе [1, 2]. Поэтому остаточ-

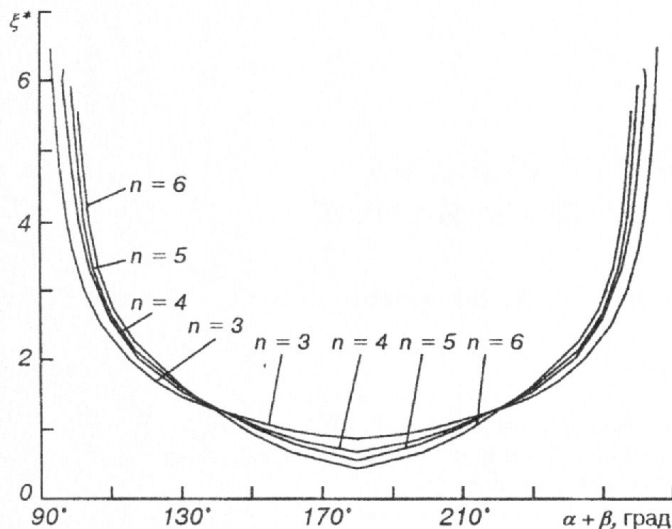


Рис. 4. Точность автобалансирующего устройства

ный дисбаланс необходимо суммировать с дисбалансом, который обусловлен другими причинами [3, 4].

На практике удобно пользоваться понятием относительной точности АБУ  $\xi = b/a$ . График зависимости относительной точности приведен на рис. 4. Он показывает, что с точки зрения приемлемой точности АБУ диапазон  $\alpha + \beta$  лежит в пределах  $120^\circ$ — $240^\circ$ . Значение остаточного дисбаланса корректирующих масс может быть определено по зависимости

$$a = GR\Delta t,$$

где  $G$  — весовой расход жидкости,  $R$  — расстояние от оси ротора до уровня жидкости в резервуаре,  $\Delta t$  — время заполнения жидкостью участка тракта от отводного патрубка до уровня жидкости в резервуаре.

Точность АБУ нелинейно зависит от скорости

вращения ротора. Чем больше скорость вращения, тем выше точность АБУ. Поэтому расчет точности следует определять для наименьшей скорости, при которой осуществляется балансировка. Точность балансировки АБУ определяет допустимый весовой расход жидкости, и следовательно, время балансировки ротора. Если расчетное время превышает допустимое время, отведенное на балансировку, то следует предусмотреть увеличение расхода жидкости на основном этапе балансировки и уменьшение его на завершаемом этапе балансировки. Тем самым обеспечивается желаемая точность АБУ и время, отпущенное на балансировку.

1. Автоматическая балансировка роторов машин / А. А. Гусаров, В. И. Сусанин, Л. Н. Шаталов, Б. М. Грушин — М.: Наука, 1979.—271 с.
2. Диментберг Ф. М., Шаталов К. Т., Гусаров А. А. Колебания машин. — М.: Машиностроение, 1964.—307 с.
3. Животов А. Ю. Режимы работы автоматического балансирующего устройства // Вісті академії інженерних наук України. Від. важкого і транспортного машинобудування.— 1997.—С. 50—54.
4. Животов А. Ю. Параметры жидкостного балансирующего устройства // Системи проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: Збір. наук. праць. — Дніпропетровськ, 1998.—Т. 1.—С. 124—130.

#### LIQUID BALANCING DEVICE FOR STATIC BALANCING UNDER CONSTANT FINAL LIQUID FLOW RATE. BALANCING ACCURACY

A. Yu. Zhivotov

The liquid automatic continuous balancing device is under consideration in this paper. A device would be appropriate for use in ground tests of space rocket technology. This one may be used for extensive application in aerospace, ship-building and automotive industries. A vector diagram of shaft balancing by means of auto-balancing device for static balancing under constant liquid flow rate is considered. An ABD accuracy is defined.