УДК 622.284.5:534.01

Увакин Станислав Викторович, соискатель
(КузГТУ, г. Кемерово)
Буялич Константин Геннадьевич, доцент, канд. техн. наук
(кафедра горных машин и комплексов КузГТУ, г. Кемерово)
Stanislav V. Uvakin, degree-seeking researcher
(KuzSTU, Kemerovo)
Konstantin G. Buyalich, associate professor, candidate of engineering sciences
(Department of Mining Machines and Complexes, KuzSTU, Kemerovo)

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ ГИДРОСТОЙКИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ КРЕПИ

EFFECT OF OPERATING AND DESIGN PARAMETERS ON NATURAL FREQUENCIES OF A POWERED ROOF SUPPORT HYDRAULIC PROP

Аннотация. Приведены результаты конечно-элементного модального анализа гидростойки крепи МКЮ.2Ш: влияние давления рабочей жидкости, положения поршня, трения и диаметра цилиндра на собственные частоты. Указаны направления дальнейших расчётов.

Abstract. Results of finite element modal analysis of the MKYu.2Sh hydraulic prop are given: the effect of fluid pressure, piston position, friction and cylinder diameter on natural frequencies. Directions of further calculations are outlined.

Ключевые слова: механизированная крепь, гидростойка, модальный анализ, метод конечных элементов, частоты собственных колебаний.
Keywords: powered roof support, hydraulic prop, modal analysis, finite element method, natural frequencies.

Механизированные крепи очистных забоев работают при циклических и динамических нагрузках. Их источники – резкие осадки пород кровли, разрушение угля исполнительным органом комбайна, работа приводов забойного оборудования, пульсации давления в гидросистеме. Взаимодействие крепи с боковыми породами, влияние начального распора на частоту и интенсивность резких осадок кровли и пути совершенствования крепей для сложных горно-геологических условий рассмотрены в работах [1–6, 31, 32]. Для процесса обрушения кровли и воздействия её колебаний на

крепь разработаны математические и численные модели [11–16, 24, 33]. Основной силовой элемент секции – гидравлическая стойка. При её отказе секция теряет несущую способность, а ресурс стойки во многом зависит от качества соединения «цилиндр–поршень» [8–10].

При сближении частот внешних воздействий с частотами собственных колебаний гидростойки возможен резонанс, при котором растут амплитуды деформаций и ускоряется износ уплотнений и опор. Собственные частоты и формы колебаний определяют модальным анализом методом конечных элементов. Выбор размерности модели гидростойки, плотности сетки и оценка точности расчёта рассмотрены в работах [7, 19–22, 30].

В 2014–2016 гг. авторами выполнена серия расчётов гидростойки серийной крепи МКЮ.2Ш Юргинского машиностроительного завода. Результаты печатались отдельными статьями. В настоящей работе они сведены вместе, чтобы показать, какие параметры и на какие частоты влияют.

Расчётная модель строилась в Autodesk Inventor по единой методике. На сварных деталях предварительно показано, что способ построения модели заметно меняет результат: напряжения в одной и той же детали при трёх способах моделирования шва составили 30, 11 и 16 МПа [17, 18]. Для гидростойки отработаны порядок подготовки модели [25] и назначение нормальной жёсткости контакта «пружина» между поршнем и цилиндром [28]. Модель проверена сопоставлением с ANSYS Workbench: по модам 1–7 частоты различаются не более чем на 1,3 %, по моде 8 – на 18,5 %; в обеих программах получены кратные частоты, характерные для осесимметричных тел [29]. Коэффициенты трения принимались по справочным данным: в опорах 0,15 для обработанных поверхностей, в паре «поршень–цилиндр» 0,1–0,25 для масел и 0,4–0,5 для водных эмульсий.

Основные размеры модели: наружный диаметр цилиндра 430 мм, внутренний 360 мм, диаметр штока 250 мм; материал деталей гидроцилиндра – сталь 30ХГСА. Нижняя опора закреплена жёстко, у верхней запрещены перемещения. Давление прикладывалось к поверхностям поршневой полости. Модальный анализ выполнялся с предварительным нагружением для 15 мод в диапазоне до 1300 Гц.

Давление рабочей жидкости. В первой серии давление менялось от 35 до 70 МПа с шагом 1 МПа. На модах 1–3 частота с ростом давления увеличивается, на модах 4–5 уменьшается, на модах 6–7 снова растёт [27]. Затем рассмотрены давления 10, 30, 50 и 70 МПа при полностью задвинутом поршне (рис. 1, а). Первая частота выросла с 14,9 до 30,1 Гц, т. е. в 2,02 раза при росте давления в 7 раз; прирост частоты с давлением замедляется. При 50–70 МПа первая и вторая, а также третья и четвёртая моды сходятся в пары с разностью частот 0,1–0,5 Гц. Это две одинаковые изгибные формы во взаимно перпендикулярных плоскостях, которые при меньшем давлении расходятся из-за несимметрии контактов. Седьмая мода (389,7–394,8 Гц) от давления не зависит.

Положение поршня. Рассчитано семь положений поршня – от полностью задвинутого (0) до максимально выдвинутого (1) – при тех же четырёх давлениях (табл. 1, рис. 1, б). В положениях 0–0,9 хода первая частота при заданном давлении почти не меняется: разброс до 1,5 Гц при 10 МПа и до 0,4 Гц при 70 МПа. При полном выдвижении штока спектр перестраивается, первая частота поднимается до 110,8–130,9 Гц. У гидростойки, следовательно, два набора собственных частот – для промежуточных положений штока и для максимальной раздвижности; при отстройке от резонанса нужно учитывать оба.

Таблица 1 – Первая собственная частота гидростойки, Гц, при разных положениях поршня (доли рабочего хода)

p, МПа	**0**	**1/3**	**1/2**	**2/3**	**0,8**	**0,9**	**1**
10	14,9	13,9	13,4	13,8	13,4	13,8	110,8
30	22,0	21,6	21,3	21,6	21,3	21,5	126,6
50	26,5	26,4	26,2	26,4	26,2	26,3	129,2
70	30,1	29,9	29,7	29,9	29,8	29,9	130,9

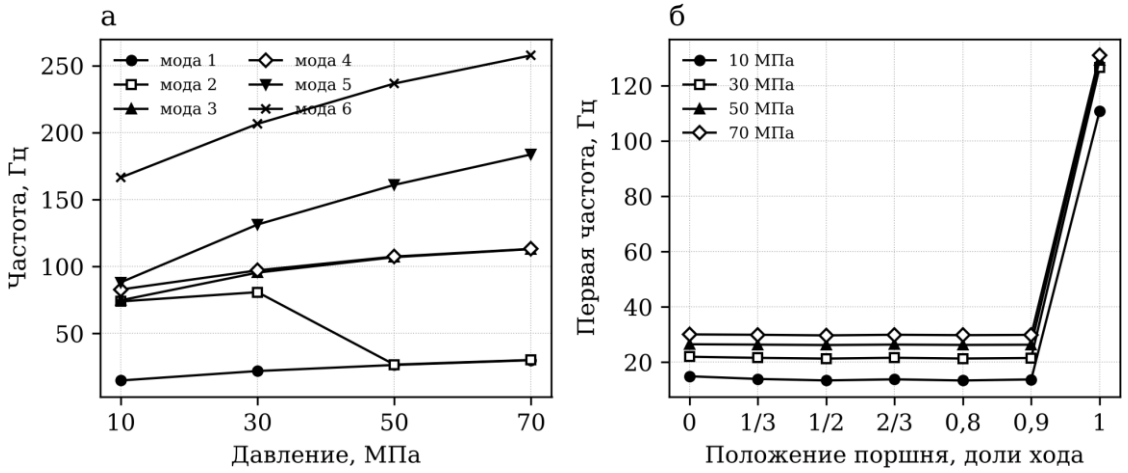

Рис. 1. Собственные частоты гидростойки МКЮ.2Ш: а – моды 1–6 при разном давлении (поршень задвинут); б – первая частота при разных положениях поршня

Трение. При давлении 70 МПа коэффициент трения в опорах менялся от 0,05 до 0,2 с шагом 0,01, в парах «поршень–цилиндр» и «шток–втулка» – от 0,1 до 0,15. Трение в опорах сказывается на модах 1, 2, 3, 6, 10 и 11, трение в уплотнениях – на модах 6, 7 и 8, где частоты различаются на 8–13 %. Моды 4, 5 и 12–15 к трению нечувствительны [26]. Общей для обоих видов трения оказалась только шестая мода.

Диаметр гидроцилиндра. Сравнивались модели с наружным диаметром цилиндра 430, 480 и 530 мм при одинаковой толщине стенки и диаметре штока. При диаметре 480 мм частоты мод 4–8 выросли, остальных – снизились. При 530 мм спектр лёг ниже, чем при 480 мм, а частоты мод 7 и 8 стали

ниже исходных. Увеличение диаметра, таким образом, не поднимает жёсткость по всем формам колебаний сразу.

Гидростойки в составе секции. Для крепи М138 построена модель секции в сборе (основания, рычаги, ограждение, перекрытие с консолью, четыре гидростойки, блоки почвы и кровли; трение в контактах 0,15; давление в поршневых полостях 50 МПа). При раздвижности секции 0 и 0,5 частоты стоек близки, при максимальной раздвижности – заметно выше, то есть зависимость та же, что у одиночной стойки. Отдельно сравнены режим начального распора (32 МПа) и режим роста сопротивления при опускании кровли, когда давление вычисляется через упругую податливость стойки по методике В. Н. Хорина (при смещении кровли 2,5 мм прирост давления 4,83 МПа). Во втором режиме частоты мод 1, 2, 3, 9 и 10 снизились примерно на 10 %, мод 5 и 6 – выросли на 15 %, а на модах 4, 5, 9 и 10 сменилась форма колебаний.

В рабочем диапазоне давлений 30–50 МПа первая собственная частота стойки МКЮ.2Ш составляет 21–27 Гц. Положение поршня до 0,9 хода на неё почти не влияет, полное выдвижение переводит стойку в другой частотный диапазон. Трение, диаметр цилиндра и режим нагружения меняют частоты отдельных мод, поэтому проверять нужно спектр до 400–500 Гц, а не только первую частоту. Поведение одиночной стойки и стоек в секции совпадает качественно, так что параметрический поиск можно вести на модели одиночной стойки, а модель секции использовать для проверки.

Дальнейшие расчёты предполагается вести в следующих направлениях: повторить серии по давлению, положению поршня и раздвижности в специализированном конечно-элементном комплексе и сравнить с данными Inventor, расширив верификацию [29] на полную модель; перейти к стойке двойной раздвижности на основе модели [23] и расчёта двухслойных цилиндров [30]; дополнить модальный анализ гармоническим и переходным с нагрузками по моделям обрушения кровли [12–16, 24, 33]; по результатам назначить диапазоны давления и раздвижности, при которых собственные частоты стойки отстроены от частот комбайна, конвейера и пульсаций давления в гидросистеме.

Список литературы

1. Буялич, Г. Д. Оценка характера взаимодействия крепи с труднообрушаемой кровлей // Совершенствование технологических процессов при разработке месторождений полезных ископаемых : сб. науч. тр. / Ассоциация «Кузбассуглетехнология». – Кемерово, 1995. – № 9. – С. 35–37.

2. Буялич, Г. Д. О направлении снижения напряжённо-деформированного состояния призабойной зоны угольного пласта / Г. Д. Буялич, Ю. А. Антонов, В. И. Шейкин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S2 : Горное машиностроение. – С. 198–202. – ISSN 0236-1493.

3. Буялич, Г. Д. Направления совершенствования механизированных крепей для отработки угольных пластов в сложных горно-геологических условиях // Горная техника : добыча, транспортировка и переработка полезных ископаемых : каталог-справочник. – СПб. : Славутич, 2007. – С. 10–16.

4. Расширение технологических возможностей механизированных крепей / Б. А. Александров, А. Н. Коршунов, А. И. Шундулиди, Г. Д. Буялич, Ю. М. Леконцев, Ю. А. Антонов. – Кемерово : Изд-во Томского ун-та, Кузбассвузиздат, 1991. – 372 с. – ISBN 5-7511-0433-1.

5. Влияние начального распора механизированной крепи на частоту и интенсивность резких осадок кровли / Б. А. Александров, Г. Д. Буялич, Ю. А. Антонов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2002. – № 6. – С. 21–22.

6. Леконцев, Ю. М. Взаимодействие системы крепь – породы при регулируемом начальном распоре механизированной крепи / Ю. М. Леконцев, Г. Д. Буялич // Вопросы горного давления : сб. науч. тр. / Ин-т горн. дела СО АН СССР. – Новосибирск, 1983. – Вып. 41 : Адаптивность механизированных крепей. – С. 56–58.

7. Определение деформаций рабочего цилиндра шахтной гидростойки / Г. Д. Буялич, В. В. Воеводин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – Кемерово, 2000. – № 6. – С. 70–71.

8. Assembly accuracy of power cylinders for powered roof supports in longwalls / Mnatsakanyan V. U., Surina N. V., Belyankina O. V., Sizova E. I. // Eurasian mining. — 2023. — №. 1. — pp. 50–54.

9. Зависимость ресурса гидростойки от уровня качества соединений / Набатников Ю. Ф., Сизова Е. И., Белянкина О. В. // Горное оборудование и электромеханика. – 2010. – № 10. –С. 29–32.

10. Достижение требуемой точности соединения цилиндр-поршень при ремонте гидростоек механизированных крепей / Мнацаканян В. У., Нго В. Н., Нгуен Т. В., Нгуен С. Х. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2022. — № S4. — С. 3—11. — DOI 10.25018/0236-1493-2022-5-4-3.

11. Буялич, Г. Д. Исследование работы предохранительного клапана ЭКП в период резких осадок кровли / Г. Д. Буялич, Ю. М. Леконцев, Б. А. Александров // Механизация горных работ : межвуз. сб. науч. тр. / Кузбас. политехн. ин-т. – Кемерово, 1978. – Вып. 2. – С. 49–55.

12. О модели динамического взаимодействия крепи с кровлей / Г. Д. Буялич, Ю. А. Антонов, К. Г. Буялич, М. В. Казанцев, В. М. Римова // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2012 : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 1–2 нояб. 2012 г. В 2-х т. Т. 1. / КузГТУ. – Кемерово, 2012. – С. 149–153. – ISBN 978-5-89070-764-2.

13. Математическая модель процесса динамического обрушения кровли / Г. Д. Буялич, Ю. А. Антонов, К. Г. Буялич, М. В. Казанцев // Гор-

ный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № S7 : Современные технологии на горнодобывающих предприятиях. – С. 233–237. – ISSN 0236-1493.

14. Численное моделирование динамических колебаний кровли при ее обрушении / Г. Д. Буялич, К. Г. Буялич, В. Ю. Умрихина // Актуальные проблемы современного машиностроения : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф., Юрга, 11–12 дек. 2014 г. / Юрг. технолог. ин-т. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2014. – С. 199–202. – ISBN 978-5-4387-0514-7.

15. Буялич, Г. Д. Определение характера и величины воздействия колебаний кровли на крепь / Г. Д. Буялич, В. Ю. Умрихина // Инновационные технологии и экономика в машиностроении : сб. тр. VI Междунар. науч.-практ. конф., Юрга, 21–23 мая 2015 г. / Юрг. технолог. ин-т. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2015. – С. 441–444.

16. Study of Falling Roof Vibrations in a Production Face at Roof Support Resistance in the Form of Concentrated Force / Buyalich G. D., Buyalich K. G., Umrikhina V. Yu. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2016. – Vol. 142: VII International Scientific Practical Conference «Innovative Technologies in Engineering». – # 012120. – DOI 10.1088/1757-899X/142/1/012120.

17. Буялич, Г. Д. Варианты расчета моделей в Autodesk Inventor 2014 / Г. Д. Буялич, В. В. Воеводин, С. В. Увакин // Сборник материалов VI Всерос., 59-й научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая», Кемерово, 22-25 апр. 2014 г. [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева». – Кемерово, 2014. – 1 CD-диск, без сопроводительной документации. – Загл. с этикетки диска. – ISBN 978-5-89070-966-0. – # 10.

18. Буялич, Г. Д. Способы построения модели в Autodesk Inventor 2014 для анализа напряжений / Г. Д. Буялич, В. В. Воеводин, С. В. Увакин // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности : сб. тр. XVI Междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 7–10 окт. 2014 г. [Электронный ресурс] – Кемерово : СО РАН, КемНЦ СО РАН, ИУ СО РАН, Кузбас. гос. техн. ун-т, ООО КВК «Экспо-Сибирь», 2014. – 1 электрон. опт. диск (CD–ROM). – Загл. с этикетки диска. – С. 111–114. – ISBN 978-5-902305-42-2.

19. Влияние размерности модели на расчёт параметров цилиндров гидростоек / Г. Д. Буялич, В. В. Воеводин, К. Г. Буялич // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2004. – № 5. – С. 42–44.

20. Методика составления модели гидростойки механизированной крепи для расчетов методом конечных элементов / Г. Д. Буялич, А. В. Воробьев, А. В. Анучин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № S7 : Современные технологии на горнодобывающих предприятиях. – С. 257–262. – ISSN 0236-1493.

21. Определение количества элементов модели по толщине стенки силового гидроцилиндра / Г. Д. Буялич, В. В. Воеводин, К. Г. Буялич // Инновационные технологии и экономика в машиностроении : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. с элементами науч. шк. для молодых ученых, Юрга, 20–21 мая 2010 г. / Юрг. технолог. ин-т. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2010. – С. 516–518. – ISBN 978-5-98298-642-9.

22. Обоснование плотности сетки цилиндра гидростойки при расчётах методом конечных элементов / Г. Д. Буялич, В. В. Воеводин, К. Г. Буялич // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № S3 : Горное машиностроение. – С. 126–129. – ISSN 0236-1493.

23. Разработка модели для исследования шахтных гидравлических стоек двойной раздвижности / Буялич Г. Д., Бяков М. А., Буялич К. Г., Увакин С. В. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № S65. – С. 21–28. – ISSN 0236-1493. – DOI 10.25018/0236-1493-2018-12-65-21-28.

24. Буялич, Г.Д. Математическое моделирование динамических явлений при обрушении кровли / Г.Д. Буялич, К.Г. Буялич, В.Ю. Умрихина // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий : материалы II межрегиональной науч.-практ. конф., Севастополь, 13–17 сент. 2016 г. / Севастопольский государственный университет. – Севастополь, 2016. – С. 73–74.

25. Буялич, Г. Д. Модальный анализ гидростойки в Autodesk Inventor / Г. Д. Буялич, С. В. Увакин // Инновационные технологии и экономика в машиностроении : сб. тр. VI Междунар. науч.-практ. конф., Юрга, 21–23 мая 2015 г. / Юрг. технолог. ин-т. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2015. – С. 158–161.

26. Буялич, Г. Д. Влияние коэффициента трения на частоты собственных колебаний гидростойки крепи / Г. Д. Буялич, С. В. Увакин // Перспективы инновационного развития угольных регионов России : сб. тр. V Междунар. науч.-практ. конф., Прокопьевск, 30–31 марта 2016 г. – Прокопьевск : изд-во филиала КузГТУ в г. Прокопьевск, 2016. – С. 273–277.

27. Буялич, Г. Д. Зависимость собственных частот гидростойки механизированной крепи от давления рабочей жидкости / Г. Д. Буялич, С. В. Увакин // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах : сб. материалов XI междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 24–25 нояб. 2015 г. – Кемерово : КузГТУ, 2015. – # 79. – 4 с. – ISBN 978-5-906805-19-5.

28. Буялич, Г. Д. Влияние нормальной жесткости на модальный анализ в Autodesk Inventor / Г. Д. Буялич, С. В. Увакин // Современные тенденции и инновации в науке и производстве : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Междуреченск, 8–10 апр. 2015 г. – Кемерово, 2015. – С. 106–107.

29. Буялич, Г. Д. Сравнение нахождения собственных частот в Autodesk Inventor 2014 и ANSYS Workbench / Г. Д. Буялич, С. В. Увакин // Инновации в технологиях и образовании : сб. ст. VIII Между-нар. науч.-практ. конф., Белово, 5–6 марта 2015 г. В 5 ч. Ч. 1 /Филиал КузГТУ в г. Белово. – Белово, Велико Тырново : Изд-во филиала КузГТУ в г. Белово, изд-во ун-та «Св. Кирилла и Св. Мефодия», 2015. – С. 328–331. – ISBN 978-5-906805-55-3.

30. Radial Strains of Double-layer Cylinders in Hydraulic Props of Powered Supports / Buyalich G. D., Buyalich K. G., Voevodin V. V. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2016. – Vol. 127: YIT-UPMME 2015. – # 012034. – DOI 10.1088/1757-899X/127/1/012034.

31. Качество взаимодействия механизированных крепей с боковыми породами / Б. А. Александров, Ю. А. Антонов, Г. Д. Буялич, К. Г. Буялич, В. И. Шейкин. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2009. – 121 с. – ISBN 978-5-7511-1857-0.

32. Повышение сопротивления консолей механизированной крепи / Г. Д. Буялич, Б. А. Александров, Ю. А. Антонов, В. В. Воеводин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2000. – № 5. – С. 82–87. – ISSN 0015-3273.

33. Calculation of fluctuations in secondary roof collapses / Buyalich G. D., Buyalich K. G., Umrikhina V. Y. // MINER'S WEEK – 2015 : Reports of the XXIII international scientific symposium. – 2015. – С. 520–525.