
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 624.042.12,624.044.2

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТНЫХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРА ДЛЯ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА

© 2022 г. М. В. Прожега^{1,*}, Е. О. Решиков¹, А. С. Арутюнова¹, Н. Н. Смирнов¹¹*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия***e-mail: maksim.prozhega@yandex.ru*

Поступила в редакцию 16.06.2022 г.

После доработки 10.08.2022 г.

Принята к публикации 19.08.2022 г.

Методом конечных элементов при помощи программного пакета Ansys проведен расчет статической прочности, долговечности и собственных частот конструкции резервуара с жидкостью. Определены концентраторы напряжений в конструкции, элементы, подверженные усталостному разрушению, собственные частоты колебаний. Результаты прочностных расчетов сопоставлены с требованиями нормативной документации. Собственные частоты сравнивались с частотой вынужденных колебаний, возникающих при работе перемешивающего устройства реактора, для оценки возможности возникновения резонанса.

Ключевые слова: расчет на прочность, собственные частоты, биореактор для биовыщелачивания

DOI: 10.31857/S0235711922060098

Объектом исследования в настоящей статье является биореактор, представляющий собой емкость с перемешивающим устройством, размещенном на мостовой конструкции (рис. 1). Биореакторы подобного типа могут использоваться для биовыщелачивания при извлечении металлов из бедных руд, хвостов флотации и отвалов [1]. Чановое биовыщелачивание в реакторах с механическим перемешиванием пульпы позволяет достигать более полного извлечения целевых компонентов с более высокой скоростью и меньшим временем. Разработка биореакторов для биовыщелачивания ставит перед инженерами следующие задачи: обеспечение подачи достаточного количества кислорода и углекислого газа, эффективное перемешивание с равномерным распределением твердой фазы в объеме пульпы, поддержание необходимой температуры [2]. Перемешивающие биореакторы обладают рядом преимуществ перед другими типами биореакторов: получение более гомогенной пульпы; лучший контроль основных параметров процесса (рН, температура, Eh и т.д.). Однако высокая стоимость ограничивает их применение. С развитием технологий объем емкости биореакторов увеличивается. В 1994 г. в Гане ввели в эксплуатацию установку Ashanti BIOX с реакторами объемом 900 м³. В 1999 г. установка по биовыщелачиванию кобальта Kasese в Уганде имела объем реакторов 1350 м³. Реакторы максимального объема на данный момент используют в установке Vogosu BIOX в Гане – 1500 м³. Такой прогресс стал возможен благодаря сочетанию многих факторов, но, вероятно, наиболее значимые из них – достижения в разработке моторов, редукторов, валов перемешивающего устройства [2].

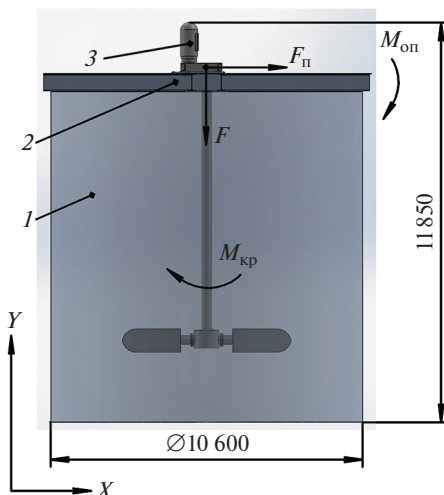


Рис. 1. Общий вид биореактора: 1 – емкость; 2 – мостовая конструкция; 3 – перемешивающее устройство.

Для исследования прочности и долговечности подобных конструкций используют метод конечных элементов (МКЭ). Полученные в результате моделирования напряжения и другие параметры сравнивают с нормативными значениями, чтобы сделать вывод о соответствии конструкции требованиям безаварийной работы [3]. МКЭ широко применяют при исследовании конструкций, которые можно отнести к классу оболочек, поскольку аналитическое решение возможно для узкого класса задач [4]. Анализ собственных колебаний резервуаров с жидкостями проводят для оценки сейсмической прочности конструкции, чтобы избежать аварий и возможного разлива содержащихся в резервуарах жидкостей [5].

В настоящей статье выполнили анализ прочности, долговечности и собственных частот колебаний конструкции биореактора при помощи метода конечных элементов в программном комплексе Ansys.

Постановка задачи исследования. В упрощенном виде биореактор (рис. 1) состоит из емкости 1, мостового перекрытия (далее мост) 2, на котором установлено перемешивающее устройство 3. Перемешивающее устройство представляет собой винт с лопастями, присоединенный к двигателю с понижающим редуктором. На рисунке не показаны коммуникации для аэрации и нагрева содержимого. На биореактор воздействуют силы и моменты, которые изменяются во времени по своему закону. Для проверки работоспособности биореактора необходимо проанализировать конструкцию по основным инженерным критериям прочности и динамики.

Цель исследований – провести инженерный расчет конструкции для оценки работоспособности изделия.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи: 1) расчет на прочность в опасных сечениях конструкции; 2) расчет долговечности при циклических нагрузках; 3) расчет собственных частот колебаний системы.

Модель для исследования. Упрощенная модель биореактора показана рис. 1.

При работе биореактор испытывает нагрузку от собственного веса элементов конструкции и нагрузки, возникающие при работе перемешивающего устройства от взаимодействия вращающегося винта с жидкостью: крутящий момент $M_{кр}$; поперечная сила, $F_{п}$; опрокидывающий момент $M_{оп}$.

Таблица 1. Численные значения нагрузок на конструкцию моста биореактора

	Нагрузка на мост	
	вариант № 1	вариант № 2
Сила F , Н	-140000	-130000
Поперечная сила $F_{\text{п}}$, Н	-6300	6300
Опрокидывающий момент $M_{\text{оп}}$, Н м	-37000	83000
Крутящий момент $M_{\text{кр}}$, Н м	40000	74000

Таблица 2. Характеристики материалов элементов конструкции биореактора

Элемент конструкции	Мост	Корпус	Винт
Материал	09Г2С	12Х18Н10Т	12Х18Н10Т
Модуль упругости, ГПа	200	190	190
Коэффициент Пуассона	0.3	0.3	0.3
Предел текучести, МПа	345	235	235
Временное сопротивление, МПа	480	530	530
Плотность, кг/м ³	7850	7900	7900

Схема приложения сил и система координат представлена на рис. 1. Численные величины нагрузок представлены в табл. 1. Расчет на статическую прочность проводили для двух вариантов нагрузок. Форма изменения нагрузки – треугольная симметричная волна (рис. 2) с частотой, соответствующей частоте вращения лопаток – 29 об/мин (0.48 Гц).

Для численного расчета на статическую прочность методом конечных элементов использовали программный комплекс Ansys 19.2 и модуль Static Structural. Разбиение на сетку модели биореактора представлено на рис. 2. Для разбиения использовали элемент SOLID186/187 с характерным размером элемента 200 мм.

Свойства материалов, из которых изготовлены элементы конструкции представлены в табл. 2.

Результаты расчетов. Результаты расчета на статическую прочность конструкции моста. Максимальные величины эквивалентных напряжений и перемещений для каждого случая нагружения показаны в табл. 3. Результаты расчета показали, что максимальное перемещение наблюдается в направлении оси y по центру моста и составляет величину – 2.28 мм при варианте нагрузок № 1 (рис. 3).

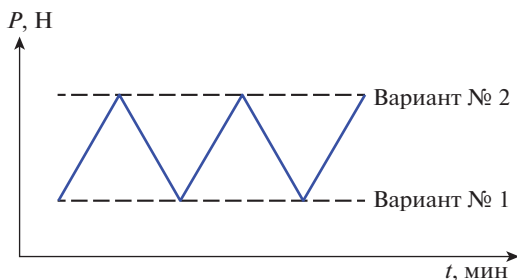
**Рис. 2.** Форма изменения нагрузки: P – нагрузка, Н; t – время, мин.

Таблица 3. Результаты расчетов на статическую прочность

Вариант нагружения	№ 1	№ 2
Макс. эквивалентное напряжение, МПа	43	36
Локализация максимальных напряжений	стык балок моста	стык балок моста
Макс. перемещения, мм	2.28	2.10
Локализация максимальных перемещений	центр моста	центр моста

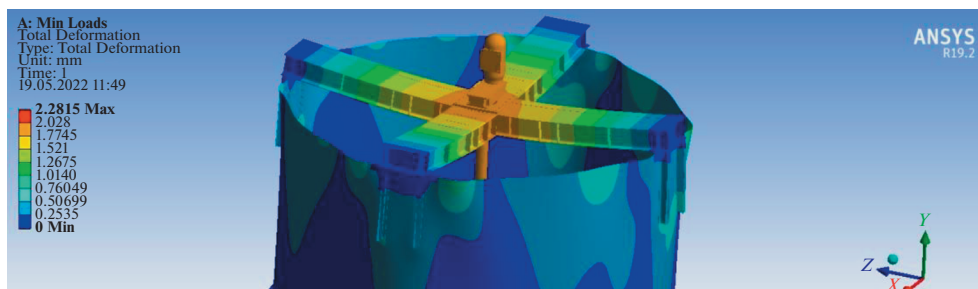
Распределение эквивалентных напряжений по конструкции биореактора приведено на рис. 4, 5 для двух случаев нагружения. Максимальное значение напряжений для случая нагружения № 1 составляет 43 МПа, № 2—36 МПа. Максимальные напряжения в обоих случаях сконцентрированы в месте стыка балок моста, и при удалении от этого места напряжения уменьшаются. Повышенный уровень напряжения наблюдается также в области крепления опор моста к биореактору.

Результаты расчета на долговечность при циклических нагрузках. Параметры усталостной долговечности (ресурс и коэффициент запаса) в Ansys 19.2 рассчитывали при помощи встроенного модуля Fatigue Tool. При этом применялся подход оценки долговечности по эквивалентным напряжениям на основе линейного статического расчета. Силовые факторы (табл. 1) изменяются с различными амплитудами, чтобы учесть различные циклы изменения сил и моментов использовался инструмент Solution Combination. Для расчета на усталость предполагали, что напряжения в конструкции изменятся по треугольной симметричной волне (рис. 2), а минимальные и максимальные значения напряжений были получены по результатам статического анализа при нагружении по двум вариантам, согласно табл. 1. Таким образом, напряжения в конструкции при расчете на усталость изменялись от 43 МПа (вариант № 1) до 36 МПа (вариант № 2).

Результаты расчета долговечности и коэффициента запаса показывают, что исследуемая конструкция выдерживает заданное число циклов нагружения — 1 млн циклов с коэффициентом запаса по усталости — 14.2.

Результаты анализа собственных частот конструкции. Чтобы избежать резонанса при работе перемешивающего устройства, частота собственных колебаний не должна совпадать с частотой вынужденных колебаний $\omega = 0.48$ Гц, вызванных вращением винта перемешивающего устройства с частотой 29 об/мин.

Для упрощения расчета считали отдельно собственные частоты винта перемешивающего устройства и биореактора, при этом перемешивающее устройство заменяли точечной массой, расположенной в центре моста.

**Рис. 3.** Поле перемещения при нагружении № 1.

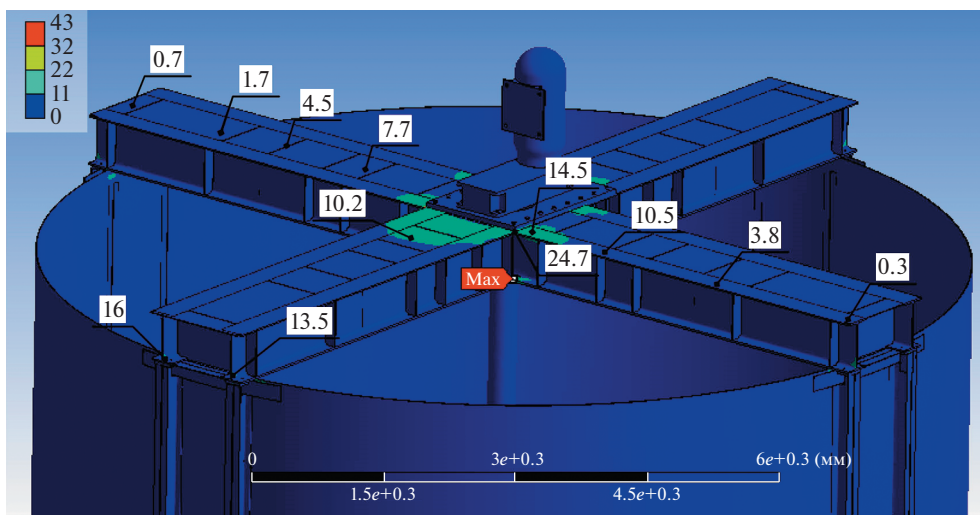


Рис. 4. Уровень напряжений, соответствующий нагрузке № 1.

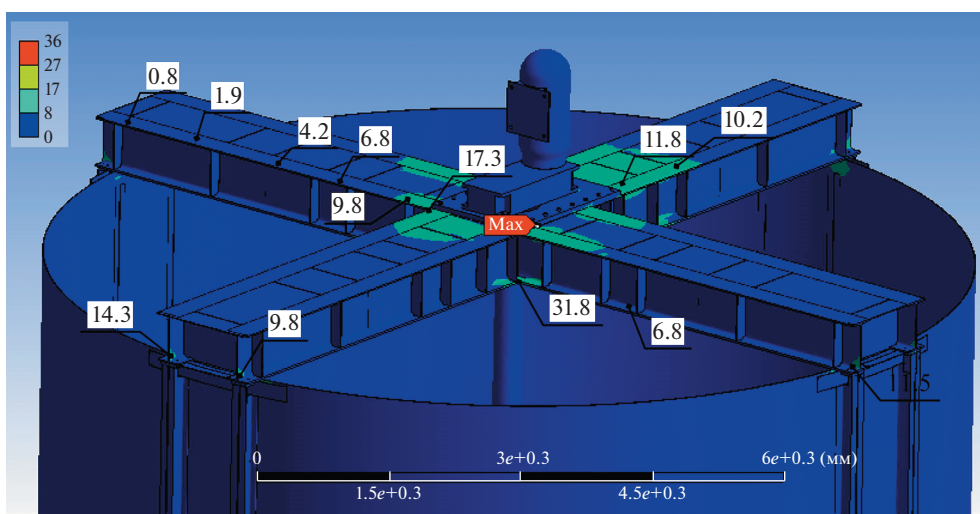


Рис. 5. Уровень напряжений, соответствующий нагрузке № 2.

Результаты расчета форм собственных колебаний винта перемешивающего устройства. Для расчетов использовали модуль Modal программного комплекса Ansys 19.2. Поверхность фланца, при помощи которого винт крепится к мотор-редуктору, считали зафиксированной. Разбиение на сетку конечных элементов представлено на рис. 6.

Результаты расчета собственных частот колебаний винта перемешивающего устройства приведены на рис. 7.

Поперечные колебания винта возникают на частоте 1.126 Гц. Форма колебаний при этом представляет собой изгиб вала конструкции относительно закрепленной геомет-

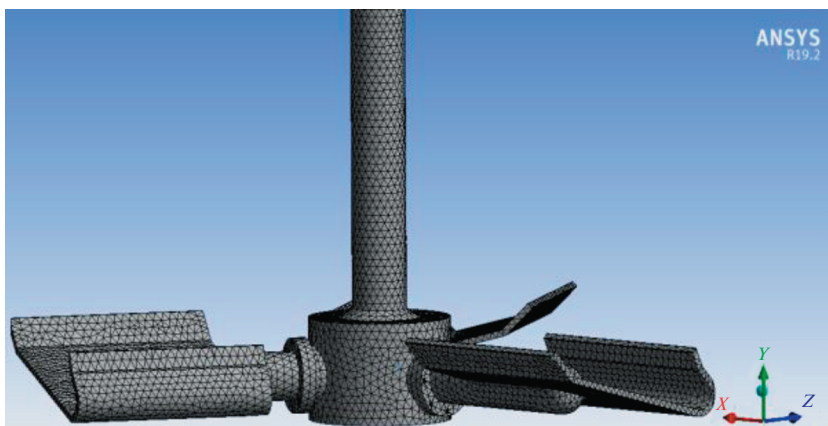


Рис. 6. Винт перемешивающего устройства, разбиение на сетку конечных элементов.

рии фланца. Крутильные колебания винта перемешивающего устройства возникают на частоте 4.418 Гц.

Результаты расчетов форм собственных колебаний биореактора. Для расчета собственных частот колебаний биореактора с учетом наполняющей его жидкости использовали модуль Modal Acoustics, в котором для анализа взаимодействия жидкости и конструкции реализован мультифизический подход (FSI). Для этого расчета предполагается уровень заполнения жидкостью на расстояние 1 м до края емкости. FSI-анализ был проведен со следующими свойствами жидкости: плотность жидкости – 1288 кг/м^3 ; скорость звука в жидкости – 1485 м/с .

При работе в Modal Acoustics жидкость моделируется как акустическая среда (Acoustic Region), а элементы конструкции как твердое тело (Physics Region), поверхность взаимодействия жидкости и твердого тела определяется автоматически при помощи инструмента Fluid Solid Interface (FSI), дно биореактора предполагается неподвижным.

Для материалов конструкции (биореактор и мост) задана плотность. Перемешивающее устройство заменено точечной массой, расположенной в центре моста.

Форма собственных колебаний конструкции биореактора приведена на рис. 8. Наименьшая частота собственных колебаний составляет 3.67 Гц. Видно, что наибольшей деформации подвержены стенки биореактора.

Результаты расчетов собственных частот колебаний конструкции биореактора приведены в табл. 4. Видно, что собственные частоты конструкции превышают частоту вынужденных колебаний, вызванных вращением винта перемешивающего устройства. Наиболее близкая частота собственных колебаний к частоте вынужденных колебаний наблюдается у винта перемешивающего устройства при поперечной форме колебаний.

Таблица 4. Частоты собственных колебаний конструкции биореактора, Гц

Биореактор	Перемешивающее устройство		Вынужденные колебания
	поперечные колебания	крутильные колебания	
3.67	1.1	4.4	0.48

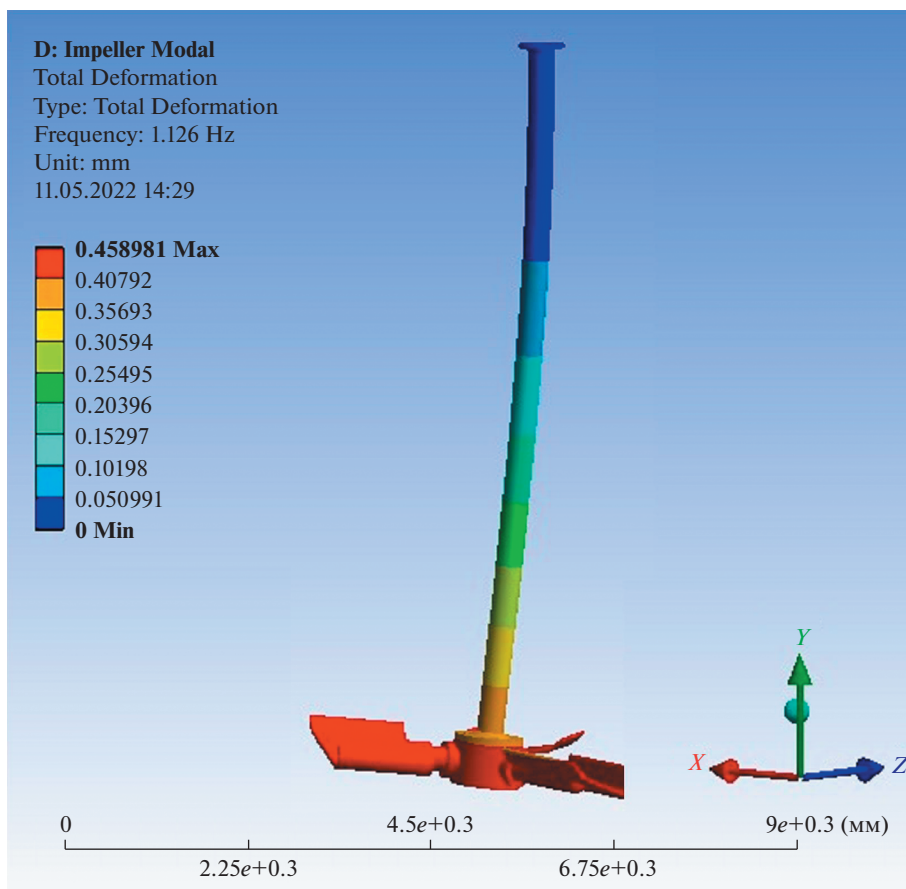


Рис. 7. Форма собственных поперечных колебаний винта перемешивающего устройства на частоте 1.126 Гц.

Обсуждение. При сопоставлении результатов прочностного анализа с механическими характеристиками материалов конструкции (табл. 3), видно, что максимальные эквивалентные напряжения, возникающие в конструкции моста, меньше предела текучести в 8 раз для первого случая нагружения и в 9.6 раза для второго.

Согласно Техническому регламенту Таможенного союза “О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением” (ТР ТС 032/2013) [6], допускаемое напряжение при расчете на прочность по предельным нагрузкам оборудования, МПа

$$[\sigma] = \frac{R_m}{2.4}, \quad (1)$$

где R_m – предел прочности материала, МПа.

Тогда $[\sigma] = 200$ МПа, что в 4.7 и в 5.6 раза меньше, чем максимальные эквивалентные напряжения для первого и второго случая нагружения соответственно.

При рассмотрении деформированной конструкции моста (рис. 4) видно, что вес перемешивающего устройства оказывает наибольшее влияние на напряженно-деформированное состояние моста. Наибольшее перемещение в обоих случаях нагружения (2.28 мм для случая № 1 и 2.10 для случая № 2) наблюдается по направлению силы тяжести в центре моста.

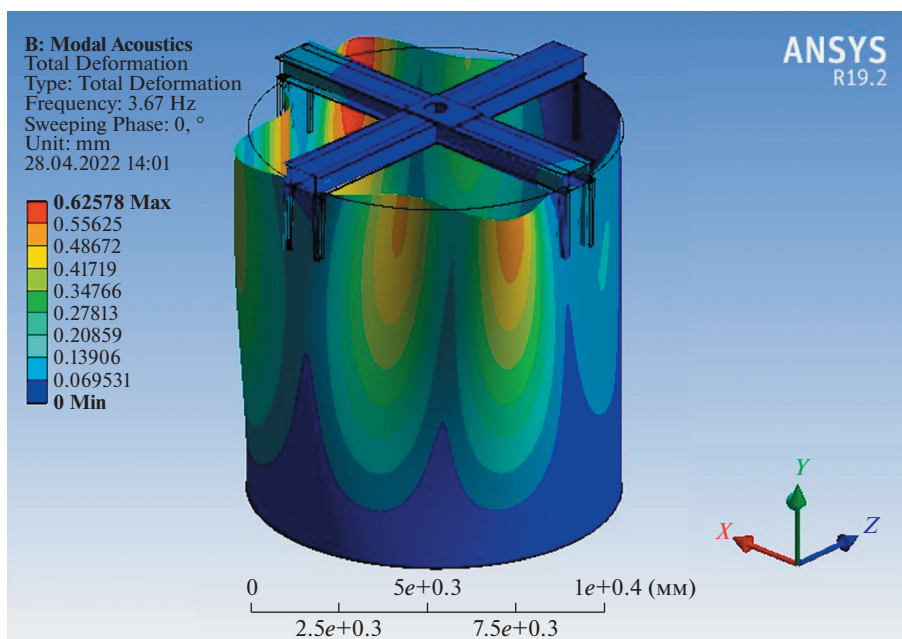


Рис. 8. Форма собственных колебаний биореактора на частоте 3.67 Гц.

Усталостное разрушение элементов конструкции может наблюдаться при действии циклических нагрузок, которые в данном случае вызваны работой перемешивающего устройства. Два случая нагружения, рассмотренные в настоящем расчете, отражают воздействие переменной нагрузки на конструкцию. Чтобы учесть характер изменения сил и моментов использовался инструмент Solution Combination, позволяющий моделировать цикл нагружения для расчетов на усталостную прочность по значениям эквивалентных напряжений, полученных при статическом расчете. Результаты моделирования показывают, что конструкция имеет достаточный запас прочности по усталости. Показанные на рис. 4, 5 места концентрации напряжений, вызывают незначительное уменьшение долговечности, коэффициент запаса по усталостной прочности составляет 14.2.

Расчет показывал, что частота собственных колебаний элементов исследуемой конструкции значительно превосходит частоту вынужденных колебаний. Наиболее близкая к частоте возмущающих колебаний частота собственных поперечных колебаний винта перемешивающего устройства – 1.1 Гц.

Заключение. В статье выполнен инженерный анализ конструкции биореактора для биовыщелачивания. В результате проведена оценка статической прочности конструкции биореактора, долговечности конструкции по критерию усталостного разрушения, определены собственные частоты колебаний элементов конструкции биореактора.

Исследованная конструкция биореактора выдерживает статические нагрузки с минимальным коэффициентом запаса по пределу текучести 8 раз, который превышает установленные нормативными документами значения.

Циклический характер нагрузки на конструкцию не приводит к усталостному разрушению элементов.

Собственные частоты колебаний элементов конструкции превышают частоту вынужденных колебаний, что обеспечивает отсутствие явления резонанса, которое может снижать работоспособность биореактора.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках госзадания по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук (пункт № 29 “Триботехника и износостойкость высоконагруженных элементов машин”, госрегистрация № 01201356317).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Левенец О.О.* Биореакторы для биовыщелачивания сульфидных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 12 (специальный выпуск 57). С. 176.
2. *Gericke M., Neale J.W., Van Staden P.J.* A Mintek perspective of the past 25 years in minerals bioleaching // The J. of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2009. V. 109. P. 567.
3. *Роцин М.Н., Москвитин Г.В., Балашова А.В.* К вопросу исследования прочности корпуса и внутрикорпусных устройств реактора ИВВ.10М // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 4. С. 47.
4. *Клочков Ю.В., Николаев А.П., Киселева Т.А., Марченко С.С.* Сравнительный анализ результатов конечно-элементных расчетов на примере эллипсоидальной оболочки // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 4. С. 44.
5. *Петровская М.В., Ворожейкин А.М.* Расчет собственных частот колебаний РВС-3000 // Доловой журнал “Neftegaz.RU”. 2015. № 11–12 (47–48). С. 78.
6. Технический регламент Таможенного союза “О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением” (ТР ТС 032/2013).