

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>В. Глухих.</i> Формирование прочности древесины при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон в процессе роста деревьев.....	2
<i>Ю. Казаков, А. Бирюков.</i> Оптимизация технологии быстрого устройства качественных навесных вентилируемых фасадов.....	10
<i>В. Кузьмичев, В. Верстов.</i> Виброактиваторы в технологии строительного производства.....	21
<i>С. Репин, А. Зызыкин, Н. Кротова.</i> Обоснование периодичности замен узлов строительных машин по заданному уровню надежности.....	30
<i>О. Третьякова.</i> Снижение касательных сил морозного пучения изменением геометрии свай.....	41

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ И СЖАТИИ ВДОЛЬ ВОЛОКОН В ПРОЦЕССЕ РОСТА ДЕРЕВЬЕВ

Владимир Глухих

Санкт-Петербургский Государственный Архитектурно-Строительный Университет,
Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская ул., д.4

vnglukhikh@mail.ru

Аннотация

В процессе роста дерева согласно основным принципам бионики в его стволе формируются начальные напряжения, обеспечивающие его прочность и устойчивость под действием ветровой нагрузки и собственного веса. С появлением начальных напряжений, в дереве начинает формироваться прочность клеток древесины. В наиболее напряженные участки ствола увеличивается приток питательных веществ, и древесина отвечает на внешние воздействия увеличением толщины стенок клеток, плотности, модуля упругости и т.д. В центральной зоне ствола возникают начальные напряжения сжатия вдоль волокон, в периферийной зоне – растяжения. В статье обоснована связь размера ядровой зоны с напряженным состоянием древесины.

Под действием начальных напряжений, древесина формируется в процессе роста дерева как анизотропный материал, имеющий различную прочность при растяжении и сжатии вдоль и поперек волокон. Принятая в статье гипотеза о параболическом распределении начального напряжения в направлении вдоль волокон позволяет не только установить размеры ядровой и заболонной зон, но и математически связать между собой пределы прочности древесины при сжатии вдоль волокон и при статическом изгибе. Это подтверждается результатами многочисленных экспериментальных исследований многих российских и зарубежных исследователей. Согласно приведенным в статье расчетным данным, отношение пределов прочности древесины различных пород при сжатии вдоль волокон и при статическом изгибе зависит от характера распределения начальных напряжений по объему ствола дерева. При условии применения компьютерных технологий, результаты исследований позволяют получать пиломатериалы с требуемой прочностью.

Ключевые слова

Рост дерева, начальные напряжения, прочность при сжатии вдоль волокон, статический изгиб.

Введение

В процессе эволюции природа создала оптимальные биологические конструкции, обладающие высокой прочностью и жесткостью, которые обеспечивают их максимальную жизнестойкость – кости скелета человека и животных, прочные костные оболочки черепов, панцирь черепахи, легкие и прочные конструкции костных скелетов птиц, мощные челюстные кости хищников и т.д. (Григорович, 1952; Иванов, 1934) Строение материалов природных конструкций растительного происхождения свидетельствует о том, что при их формировании в процессе роста наиболее прочные волокна костных тканей, древесины и других материалов совпадают по направлению с наибольшими напряжениями и деформациями, обеспечивая за счет мощного каркаса необходимую прочность (Раздорский, 1934).

Поскольку, материалы природных конструкций имеют неодинаковую прочность при растяжении и сжатии, в них в процессе роста формируются начальные напряжения, способствующие уменьшению напряжений в наиболее слабых зонах несущего каркаса и повышению напряжений в более прочных зонах. Таким образом, на протяжении всего процесса роста происходит непрерывное формирование равнопрочного по всему объему материала при минимальном его расходе.

Например, при ветровой нагрузке и раскачивании деревьев, напряжения в волокнах, расположенных в сжатой зоне ствола, уменьшаются, суммируясь с начальными напряжениями. В то же время в более прочной – растянутой зоне – суммарное напряжение увеличивается примерно в два раза, как это отмечается в исследованиях (Кузнецов, 1950; Kübler, 1959; Белов, 1974; Глухих, Акопян, 2016; Ашкенази, 1978).

В наиболее напряженные части ствола дерева увеличивается приток питательных веществ, толщина стенок клеток, плотность древесины, модуль упругости, изменяется соотношение размеров ширины ранней и поздней зон годичных слоев. Все эти процессы приводят в конечном счете к повышению прочности древесины. Это обеспечивает жизнестойкость стволов.

В отличие от создаваемых человеком композиционных материалов по образцу и подобию природных, материалы растительного происхождения относятся к «реагирующим», изменяющим свое строение и свойства в зависимости от внешних воздействий.

В своих исследованиях В. Г. Темнов (Темнов, 1996; 2001) установил «бионический принцип регулирования параметров напряженно-деформированного состояния конструктивных систем». Данный принцип обосновывает закономерности формирования природных материалов растительного происхождения на основе гармоничной связи внешних сил с внутренними. Эта связь способствует получению конструкции с высокой работоспособностью и живучестью.

В отличие от природных, в создаваемых человеком композиционных и других материалах отсутствует активное регулирование НДС в ответ на внешние воздействия (Глухих, Акопян, 2013).

В современной литературе не встречается сведений о результатах исследований влияния НДС стволов деревьев, сформировавшегося в процессе их роста, на прочность и жесткость изделий из древесины, используемых в строительстве (Ylinen, 1956; Kollmann, 1951; Kuffner, 1978; Cucera, 1970).

Методика исследования

Для установления закона распределения начальных напряжений в сечениях ствола дерева были учтены результаты исследований финского ученого А. Ylinen (Ylinen, 1952; 1956), немецкого Н. Kübler (Kübler, 1959), наших соотечественников Е. К. Ашкенази (Ашкенази, 1978), С. В. Белова (Белов, 1974) и А. И. Кузнецова.

Во всех перечисленных работах отмечается, что волокна древесины в периферийной области сечения ствола дерева растянуты, а в центральной – испытывают сжатие. При этом, Н. Kübler предлагает логарифмический закон, а А. И. Кузнецов и А. Ylinen – параболический закон распределения начальных напряжений по радиусу сечения. Анализируя параболический закон, предложенный Н. Kübler, Е. К. Ашкенази отмечает, что распределение начальных напряжений по радиусу сечения ствола в этом случае не является равновесным. Предположительно, к такому выводу Е. К. Ашкенази пришла, анализируя эпюру напряжения в радиальном сечении без учета пространственной поверхности распределения начального напряжения в форме параболоида.

Принимая в частном случае функцию начальных напряжений в виде параболоида 2-го порядка (рисунок 1):

$$\sigma \equiv \frac{4(\sigma_R + \sigma_0)}{d^2} * (z^2 + y^2) - \sigma_0 \quad (1)$$

где σ – начальное напряжение в точке с координатами y, z ;

σ_R, σ_0 – значение начального напряжения в точках в центре и на контурах сечения;

d – диаметр исследуемого сечения.

Можно установить размеры зон с начальными напряжениями растяжения и сжатия с использованием формулы (1):

$$R_0 = \sqrt{\frac{\sigma_0 d^2}{4(\sigma_R + \sigma_0)}} \quad (2)$$

Из уравнения равновесия находим соотношение напряжений в центре и на контуре сечения:

$$\sum X = \frac{\pi d^2}{4} \left[\sigma_R - \frac{\sigma_R^2}{2(\sigma_R + \sigma_0)} - \frac{\sigma_R \sigma_0}{\sigma_R + \sigma_0} \right], \quad (3)$$

откуда получим:

$$\sigma_R = \sigma_0 \quad (4)$$

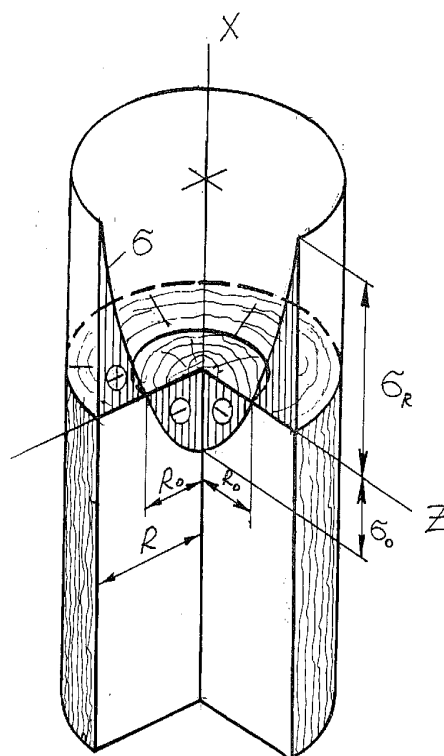


Рисунок 1. Распределение начальных напряжений в продольном направлении по радиусу сечения ствола дерева

С учетом последнего, радиус центральной (сжатой) зоны из формулы (2) составит:

$$R_0 = 0,707 \frac{d}{2} = 0,707R \quad (5)$$

В соответствии с рисунком 2 при критической скорости ветра в плоскости действия напора ветра суммарное напряжение в точке 1 на контуре сечения в зоне сжатия уменьшится до нуля, а в зоне растяжения в точке 2 увеличится в 2 раза, оставаясь неизменным в центре сечения.

При критическом напоре ветра суммарное напряжение с учетом изгиба ствола дерева можно проанализировать с использованием формулы (4):

$$\sigma = \frac{2\sigma_R}{R^2}(z^2 + y^2) + \frac{\sigma_R}{R}Z - \sigma_0 \quad (6)$$

Исследование этой функции в диаметральной сечении в плоскости действия ветрового напора на экстремум позволяет найти максимальную величину суммарного напряжения в зоне сжатия:

$$\frac{d\sigma}{dz} = -4 \frac{\sigma_0}{R^2}z - \frac{\sigma_0}{R} = 0, \text{ откуда } Z_0 = -\frac{R}{4} \quad (7)$$

Максимальное значение сжимающего напряжения составит:

$$\sigma_{MAX.P} = \frac{2\sigma_R}{R^2} \left(-\frac{R}{4}\right)^2 + \frac{\sigma_R}{R} \left(-\frac{R}{4}\right) - \sigma_0 = -\frac{9}{8}\sigma_0 \quad (8)$$

В процессе роста дерева экстремальная точка постепенно смещается по радиусу в направлении от центра сечения и в зоне сжатия формируется предельное сжимающее напряжение вдоль волокон, составляющее 1,125 от напряжения в центре сечения.

Максимальное напряжение в зоне растяжения достигнет величины:

$$\sigma_{\max.p} = \frac{2\sigma_R}{R^2} R^2 + \frac{\sigma_R}{R} R - \sigma_R = 2\sigma_R \quad (9)$$

Учитывая характер распределения суммарного напряжения в зоне сжатия (ядровой зоне), можно предположить, что при критическом ветровом напоре предельное сжимающее напряжение способствует формированию прочности древесины при сжатии вдоль волокон, а максимальное напряжение растяжения в точке на поверхности заболонной зоны – прочности древесины при статическом изгибе. На этом основании отношение пределов прочности древесины при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон составит:

$$\frac{\sigma_B}{\sigma_{\sigma}} = \frac{2\sigma_R}{1,125\sigma_R} = 1,778 \quad (10)$$

Аналогичный расчет можно выполнить для других случаев распределения начальных напряжений, в отличие от рассмотренного (таблица 1).

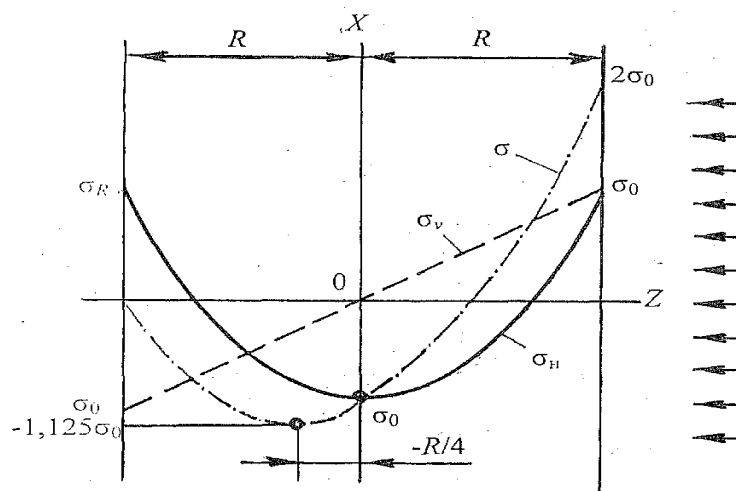


Рисунок 2. Связь размера ядровой зоны с характером изменения начального напряжения

Результаты исследований

Результаты исследований внесены в таблицу 1. Чем сложнее функция, тем больше радиус ядровой зоны. Характер распределения суммарного напряжения с учетом ветровой нагрузки влияет на положение зоны экстремального сжатия и отношение пределов прочности древесины при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон. С увеличением ядровой зоны сечения отношение пределов прочности при изгибе и сжатии вдоль волокон плавно возрастает.

Принятые в исследованиях функции начальных и суммарных напряжений подтверждаются имеющимися в литературе экспериментальными данными (таблица 2, 3) по породам деревьев Европы, Азии, Африки, Северной и Южной Америки.

Для описания пород, не соответствующих принятым функциям, требуются дополнительные теоретические исследования.

Таблица 1. Сопоставление размеров ядровой зоны и прочности древесины при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон.

Закон изменения начального напряжения по радиусу сечения	Радиус ядровой зоны R_0	Напряжение в центре сечения ствола	Максимальное напряжение растяжения в точке на контуре сечения	Максимальное сжимающее напряжение	Максимальное напряжение растяжения с учетом ветровой нагрузки	Отношения пределов прочности при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон
Логарифмический закон [Н. Kübler]	0,606R	$-\sigma_0$	$0.5\sigma_0$	$-\sigma_0$	σ_0	1
Коническое распределение	0,667R	$-\sigma_0$	$0.5\sigma_0$	$-\sigma_0$	σ_0	1
$\sigma_n = k_2 r^2 + b_0$	0,707R	$-\sigma_0$	σ_0	$-1.125\sigma_0$	$2\sigma_0$	1,778
$\sigma_n = k_4 r^4 + b_0$	0,76R	$-\sigma_0$	$2\sigma_0$	$-1.8255\sigma_0$	$4\sigma_0$	2,191
$\sigma_n = k_6 r^6 + b_0$	0,794R	$-\sigma_0$	$3\sigma_0$	$-2.65\sigma_0$	$6\sigma_0$	2,265
$\sigma_n = k_8 r^8 + b_0$	0,818R	$-\sigma_0$	$4\sigma_0$	$-3.519\sigma_0$	$8\sigma_0$	2,273
$\sigma_n = k_{10} r^{10} + b_0$	0,836R	$-\sigma_0$	$5\sigma_0$	$-4.414\sigma_0$	$10\sigma_0$	2,265
$\sigma_n = k_{12} r^{12} + b_0$	0,85R	$-\sigma_0$	$6\sigma_0$	$-5.327\sigma_0$	$12\sigma_0$	2,253
$\sigma_n = k_{14} r^{14} + b_0$	0,862R	$-\sigma_0$	$7\sigma_0$	$-6.5\sigma_0$	$14\sigma_0$	2,24
$\sigma_n = k_2 r^2 + k_1 r + b_0$	0,686R	$-\sigma_0$	$4/3 \sigma_0$	-	-	1,524
$\sigma_n = k_4 r^4 + k_2 r^2 + b_0$	0,731R	$-\sigma_0$	$2/3\sigma_0$	$-1.295\sigma_0$	$8/3\sigma_0$	2,05
$\sigma_n = k_6 r^6 + k_2 r^2 + b_0$	0,768R	$-2\sigma_0$	$4\sigma_0$	$-3.495\sigma_0$	$8\sigma_0$	2,289
$\sigma_n = k_8 r^8 + k_2 r^2 + b_0$	0,79R	$-2\sigma_0$	$5\sigma_0$	$-4.4058\sigma_0$	$10\sigma_0$	2,27
$\sigma_n = k_{12} r^{12} + k_2 r^2 + b_0$	0,8206R	$-2\sigma_0$	$7\sigma_0$	$-5.905\sigma_0$	$14\sigma_0$	2,37
$\sigma_n = k_{14} r^{14} + k_2 r^2 + b_0$	0,833R	$-2\sigma_0$	$8\sigma_0$	$-6.7768\sigma_0$	$16\sigma_0$	2,36
$\sigma_n = k_{14} r^{14} + k_4 r^4 + b_0$	0,829R	$-2\sigma_0$	$9\sigma_0$	$-7.6697\sigma_0$	$18\sigma_0$	2,347

Таблица 2. Значения пределов прочности при сжатии вдоль волокон и при статическом изгибе для отечественных пород древесины при влажности выше 30% (Волинский, 2006).

Порода	Предел прочности, МПа		Отношение пределов прочности при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон
	Сжатие вдоль волокон	Статический изгиб	
Сосна обыкновенная	21,2	49,5	2,335
Сосна кедровая	18,5	42,3	2,286
Орех грецкий	23,8	60,7	2,55
Осина	19,2	45,4	2,36
Пихта белая	19,4	44,7	2,30
Пихта белокорая	18,4	45,2	2,45
Пихта кавказская	19,9	48,4	2,43
Пихта сибирская	17,5	40,4	2,31
Пихта цельнолистная	16,6	42,0	2,53
Тополь	17,8	40,3	2,26
Ясень маньчжурский	29,3	67,2	2,29
Ясень обыкновенный	32,5	74,3	2,28
Ясень остроплодный	40,2	88,8	2,21
Ясень пенсильванский	33,3	71,6	2,15
Акация белая	41,6	97,5	2,34

Береза бородавчатая	22,4	59,7	2,66
Береза даурская	21,0	66,2	3,15
Береза железная	37,3	82,7	2,217
Береза ребристая	25,6	66,9	2,61
Бук	25,9	64,6	2,49
Вяз	25,2	59,1	2,34
Граб	26,5	73,3	2,76
Груша	26,7	63,4	2,37
Дуб араксинский	29,7	56,2	1,89
Дуб восточный	28,7	54,4	1,89
Дуб грузинский	30,9	58,8	1,90
Дуб каштанolistный	33,9	82,9	2,44
Дуб черешчатый	31,3	67,8	2,18
Ель	19,6	43,9	2,24
Ива	16,8	41,6	2,47
Клен	28,2	77,7	2,75
Липа	24,2	54,2	2,24
Лиственница	25,3	61,7	2,44
Ольха	23,6	49,4	2,09

Для некоторых пород соотношение между пределами прочности при статическом изгибе и при сжатии вдоль волокон свидетельствует о достаточно простой функции распределения начального напряжения. Например, у дуба черешчатого это распределение подчиняется закону параболоида 4-й степени. Этому соответствует радиус ядровой зоны $0,76R$.

У тополя с радиусом ядра $0,794R$ распределение по закону параболоида 6-й степени. Параболоид 14-й степени характеризует древесину ели с радиусом ядровой зоны $0,862R$. Древесине ольхи с радиусом ядра $0,731R$ близко подходит сложная функция распределения начальных напряжений, содержащая 2-ю и 4-ю степени переменной.

Характер изменения начальных напряжений может быть установлен для любой породы по размеру ядровой зоны, которой соответствует определенное соотношение пределов прочности при статическом изгибе и при сжатии вдоль волокон.

В таблице 3 приведено сравнение прочности при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон древесины хвойных пород США и Канады.

Таблица 3. Сравнение прочности при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон древесины хвойных пород США и Канады по данным Н. Л. Леонтьева, В. Н. Волынского при влажности выше 30%.

Порода	Предел прочности, МПа		Отношение пределов прочности при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон
	Сжатие вдоль волокон	Статический изгиб	
Дугласия (кан.)	24,9	52	2,09
Дугласия западная	26,7	53	1,99
Дугласия прибрежная	26,1	53	2,03
Дугласия северная	23,9	51	2,14
Дугласия южная	21,4	47	2,20
Ель белая	17,7	39	2,21
Ель Энгельмана	15	32	2,14
Ель красная	18,3	40	2,19
Ель ситхинская	17,6	37	2,11
Ель черная	17,7	37	2,09
Кедр виргинский	24,6	48	1,96

Ель Энгельмана	19,4	39	2,01
Кедр калифорнийский	21,7	43	1,99
Кедр кипарисовик	22,3	46	2,07
Кедр нутканский	21	44	2,10
Кедр туевидный	16,5	32	1,94
Кипарис болотный	24,7	46	1,87
Кипарисовик Лавсона	21,6	46	2,13
Лиственница американская	21,6	47	2,18
Лиственница американская	24	50	2,09
Лиственница западная	30,5	60	1,97
Пихта бальзамическая	16,5	34	2,06
Пихта бальзамическая	16,8	36	2,15
Пихта благородная	20,8	43	2,07
Пихта великая	20,3	40	1,97
Пихта калифорнийская	19	40	2,11
Пихта миловидная	21,6	44	2,04
Пихта миловидная	19,1	38	1,99
Пихта одноцветная	20	41	2,05
Пихта субальпийская	15,9	34	2,14
Пихта субальпийская	17,2	36	2,10
Секвойя молодая	21,4	41	1,92
Сосна Банкса	20,3	41	2,02
Сосна Банкса	20,3	43	2,12
Сосна Веймутова	16,8	34	2,03
Сосна Веймутова	17,9	35	1,96
Сосна виргинская	23,6	50	2,12
Сосна голая	19,6	41	2,10
Сосна длиннохвойная	29,8	59	1,98
Сосна желтая	16,9	35	2,02
Сосна желтая	19,6	39	1,99
Сосна жесткая	20,3	47	2,32
Сосна закрытая	23,7	52	2,20
Сосна зап. белая	16,8	32	1,91
Сосна зап. белая	17,4	33	1,90
Сосна короткохвойная	24,3	51	2,10
Сосна красная	18,8	40	2,13
Сосна красная	16,3	34	2,09
Сосна ладанная	24,2	50	2,07
Сосна поздняя	25,2	51	2,03
Сосна сахарная	18	38	2,12
Сосна скрученная	18	38	2,12
Сосна скрученная	19,7	39	1,98
Сосна Эллиота	26,3	60	2,29
Туя западная	13,7	29	2,12
Туя западная	13	27	2,08
Туя складчатая	19,1	36	1,89
Туя складчатая	19,2	36	1,88
Хемлок восточный	21,2	44	2,08

Хемлок восточный	23,6	47	2,00
Хемлок западный	23,2	46	1,99
Хемлок горный	19,9	43	2,16

Из 172 приведенных В. Н. Волынским пород древесины США, Канады, Южной Азии, тропическим стран Африки и Южной Америки (таблица 2, 3) 38 пород имеют повышенное отношение пределов прочности при статическом изгибе и сжатии вдоль волокон (как и некоторые отечественные породы). Для анализа начальных напряжений в пиломатериалах из этих пород древесины требуется установить закон их распределения по объему ствола дерева. Распределение начальных напряжений, как показали два последних расчета, может быть описано более сложной функцией, включающей набор достаточно простых рассмотренных нами функций.

Таким образом, с помощью разработанных математических моделей по отношению радиусов ядровой и заболонной зон сечений стволов деревьев в процессе обработки древесины, можно определять её прочность при сжатии вдоль волокон и статическом изгибе. Результаты исследований имеют кроме научного, еще и практический интерес при изготовлении пиломатериалов конструкционного назначения и строительных конструкций из дерева.

Характер распределения начальных напряжений по объему ствола дерева позволяет прогнозировать образование пороков древесины в процессе его роста.

Литература

- Cucera, B. (1970). Einfluss einiger Fehler auf die Biegefestigkeit von Fichtenholz. *Holztechnologie*, 11(4), pp. 210–216.
- Kollmann, F. (1951). *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Berlin: Springer.
- Kübler, H. (1959). Die Ursache der Wachstumspannungen und die Spannungen quer zur Faserrichtung. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 17(1), pp 1–9.
- Kuffner, M. (1978). Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit von Holz verschiedenen Rohdichte in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 11, pp 435–440.
- Ylinen, A. (1952). Über die mechanische Schaftformtheorie der Bäume. Technische Hochschule in Finland. Technische Hochschule in Finland. *Wissenschaftliche Forschungen*, vol. 6, 51 p.
- Ylinen, A. (1956). *Über den Einfluss des Spätholzteilens und der Rohwichte auf die Elastizitätsmoduln die Poussonischen Konstanten und die Schubmoduln bei Holz mit ausgeprägten Jahrringbau*. Technische Hochschule in Finland. *Wissenschaftliche Forschungen*, vol. 9.
- Ашкенази, Е.К. (1978). *Анизотропия древесины и древесных материалов*. Москва: Лесная промышленность, 224 с.
- Белов, С.В. (1974). Ветер – главный фактор, определяющий форму стволов деревьев и их устойчивость. *Лесоводство, лесные культуры, почвоведение*, 3, стр. 3–24.
- Волынский, В.Н. (2006). *Взаимосвязь и изменчивость физико-механических свойств древесины*. Архангельск: АГТУ, 196 с.
- Глухих, В.Н., Акопян, А.Л. (2013). К вопросу о напряжениях роста в дереве. В: *материалах международной научно-практической конференции «Современные проблемы переработки древесины»*. СПб: СПбПУ, 185 с.
- Глухих, В.Н., Акопян, А.Л. (2016). *Начальные напряжения в древесине*. СПб: СПбГАСУ, 118 с.
- Григорович, В.К. (1952). О наивыгоднейшем направлении волокон в изделиях из анизотропных материалов. *Доклады Академии наук СССР*, 86(4), стр. 152–160.
- Иванов, Л.А. (1934). О влиянии ветра на рост дерева. *Ботанический журнал СССР*, 13(3).
- Кузнецов, А.И. (1950). *Внутренние напряжения в древесине*. Москва: ГЛБИ, 60 с.
- Раздорский, В.Ф. (1934). Принципы строения скелета растений. *Природа*, 9.
- Темнов, В.Г. (1996). Бионический принцип регулирования параметров напряженно-деформированного состояния конструктивных систем при их проектировании и эксплуатации. В: *материалах 53 научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета*. СПб: СПбГАСУ.
- Темнов, В.Г. (2001). *Конструктивные системы в природе и строительной технике*. СПб: Компьютербург, 61 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРОГО УСТРОЙСТВА КАЧЕСТВЕННЫХ НАВЕСНЫХ ВЕНТИЛИРУЕМЫХ ФАСАДОВ

Юрий Казаков¹, Александр Бирюков²

¹Санкт-Петербургский Государственный Архитектурно-Строительный Университет, Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская ул., д.4

²Военный институт (инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева Россия, 190000, г. Санкт-Петербург, Захарьевская ул., д.22

kazakov@spbgasu.ru¹, aleks_bir@mail.ru²

Аннотация

Исследованы методом системного анализа недостаточно изученные ранее новые конструктивно-технологические решения различных типов современных навесных вентфасадов (НВФ) в России к 2017 году с выявлением их достоинств и недостатков. Разработаны теоретические основы и алгоритм формирования оптимального варианта технологического решения на монтаж НВФ методом многокритериальной оптимизации. Обоснована структура и последовательность операций в рациональной технологии комплексного механизированного процесса монтажа элементов НВФ. Разработаны варианты оптимизированных технологических решений монтажа теплоизоляционных, каркасных и облицовочных элементов в НВФ с учетом наиболее важных критериев оптимальности. Это минимум затрат труда и машинного времени, минимум стоимости, повышенного качества и безопасности.

Выявлены и обоснованы путем экспериментального строительства жилых домов с НВФ зависимости влияния наиболее важных факторов по снижению трудоемкости и стоимости выполнения строительных процессов и увеличение срока эксплуатации НВФ в различных условиях строительства. Методами вариантного технологического проектирования и многокритериальной оптимизации разработаны 4 оптимизированных варианта для технологических решений монтажа теплоизоляционных, каркасных и облицовочных элементов в системах НВФ с учетом 4 наиболее важных потребительских критериев оптимальности: минимума затрат труда и машинного времени, минимума стоимости, повышенного качества и максимума качества и безопасности. Научная значимость результатов состоит в том, что выявлены и исследованы основные факторы, влияющие на оптимизацию технологических режимов устройства различных видов НВФ. Их использование позволяет снизить трудоемкость работ до 0,55 - 1,85 чел.-см. на 1 кв. м площади фасада.

Ключевые слова

Фасады, монтаж, стоимость, трудоемкость, оптимизация, вентиляция, качество.

Введение

В СПбГАСУ авторами, совместно с к.т.н. А.Е.Пискуном и на основе его работ, было выполнено дальнейшее теоретическое обоснование разработки рациональных технологических решений для устройства НВФ. Целью работы является научное обоснование и разработка и совершенствованных вариантов устройства навесных вентилируемых фасадов, оптимизированных по критериям минимума затрат труда и машинного времени, минимума стоимости, повышенного качества и безопасности при строительстве жилых домов. Объектом исследования являются строительные процессы и конструктивно-технологические решения устройства усовершенствованных рациональных вариантов навесных вентилируемых фасадов для возведения различных видов жилых домов в России.

Методика исследования

Сравнительное вариантное технологическое проектирование, технико-экономический системный анализ инженерных решений, натурные эксперименты с фрагментами НВФ, теоретическое моделирование, экспериментальные замеры и исследования технологических параметров процессов возведения стен жилых домов, математическая статистика и теория вероятности при решении оптимизационных задач. Установлены

новые и важные для снижения трудоемкости и стоимости работ и для повышения простоты и технологичности работ зависимости увеличения затрат труда от увеличения площади монтируемых элементов НВФ, их веса и других факторов влияния с критериями оптимальности минимума стоимости, трудоемкости и максимума качества. Методами математической статистики рассчитаны математические модели, которые аппроксимируют выявленные зависимости. Методом замеров на объектах определены важные новые зависимости снижения производительности труда при устройстве НВФ от влияния наиболее важных природно-климатических факторов – низких отрицательных температур и скорости ветра. Доказаны высокие технико-экономическая эффективность и технологичность применения усовершенствованных вариантов рациональных решений устройства НВФ для жилых зданий по критериям трудоемкости и стоимости работ, сроку эффективной эксплуатации теплоизоляционной конструкции и ремонтпригодности.

Предпосылки

Предпосылками исследования явились работы авторов (Казakov, 2011; Badjin et al., 2015) и к.т.н. А.Е.Пискуна (Пискун, Казakov, 2008а; Пискун, Казakov, 2008б), выявленные зарубежные источники (Godish, 2001; Burton, 2014; Alvaro de Gracia и др., 2013; Hegger и др., 2012; Tusnina и др., 2014; Knaack и др., 2014; Vorob'ev, Zapashchikova, 2015) и материалы их дальнейшего развития авторами в 2011-2016гг. Для этого выполнено моделирование оптимальных технологических решений для устройства НВФ жилых зданий на основе критериев минимума затрат и безопасности. Выявлены и исследованы закономерности влияния основных воздействующих факторов на технологические решения устройства НВФ.

Результаты

Разработаны теоретические модели, алгоритмы и рекомендации для проектирования рациональных режимов и различных видов технологий устройства НВФ (рисунок 1, 2). Оптимальной теплоизоляцией предлагается считать минераловатные жесткие плиты из базальтового волокна. К оптимальным облицовкам можно отнести, фиброцементные листы, виниловый сайдинг, керамогранит, к каркасу – оцинкованную и нержавеющую сталь, зонтичные саморезы и болты.

С учетом 4 наиболее важных потребительских критериев оптимальности – минимума затрат труда и машинного времени, минимума стоимости, повышенного качества и максимума качества - разработаны 4 усовершенствованных варианта рациональных технологических решений монтажа теплоизоляционных, каркасных и облицовочных элементов в системах НВФ. Установлены новые и важные для повышения технологичности работ зависимости увеличения затрат труда от увеличения площади монтируемых элементов НВФ, их веса и других факторов влияния с критериями оптимальности минимума стоимости, трудоемкости и максимума качества. Методами математической статистики рассчитаны математические модели, которые аппроксимируют выявленные зависимости. Это позволило далее методом замеров на объектах далее определить важные и новые зависимости снижения производительности труда при устройстве НВФ от влияния наиболее важных природно-климатических факторов – низких отрицательных температур и скорости ветра (Казakov, 2011).

Далее было проведено исследование технико-экономической эффективности применения рациональных решений устройства НВФ жилых зданий. Выполнен анализ вариантов технологий устройства НВФ по результатам экспериментального строительства. Стоимость монтажа составила 2,25 - 3,95 тыс. руб за 1 кв. м площади фасада, что в 1,3 – 1,6 раз дешевле существующих сопоставимых традиционных методов устройства невентилируемых фасадов (Пискун, Казakov, 2008). Полученные выше результаты позволили далее обосновать технологическую карту на устройство навесного вентилируемого фасада по наиболее востребованным и весомым критериям оптимальности - минимума трудоемкости и стоимости работ (рисунок 4, 5).

В технологической карте указана область ее применения, изложены основные положения по организации и технологии производства работ при монтаже элементов вентилируемого фасада, приведены требования к качеству работ, технике безопасности, охране труда и противопожарным мероприятиям, определена потребность в материально-технических ресурсах, рассчитаны затраты труда и график производства работ.

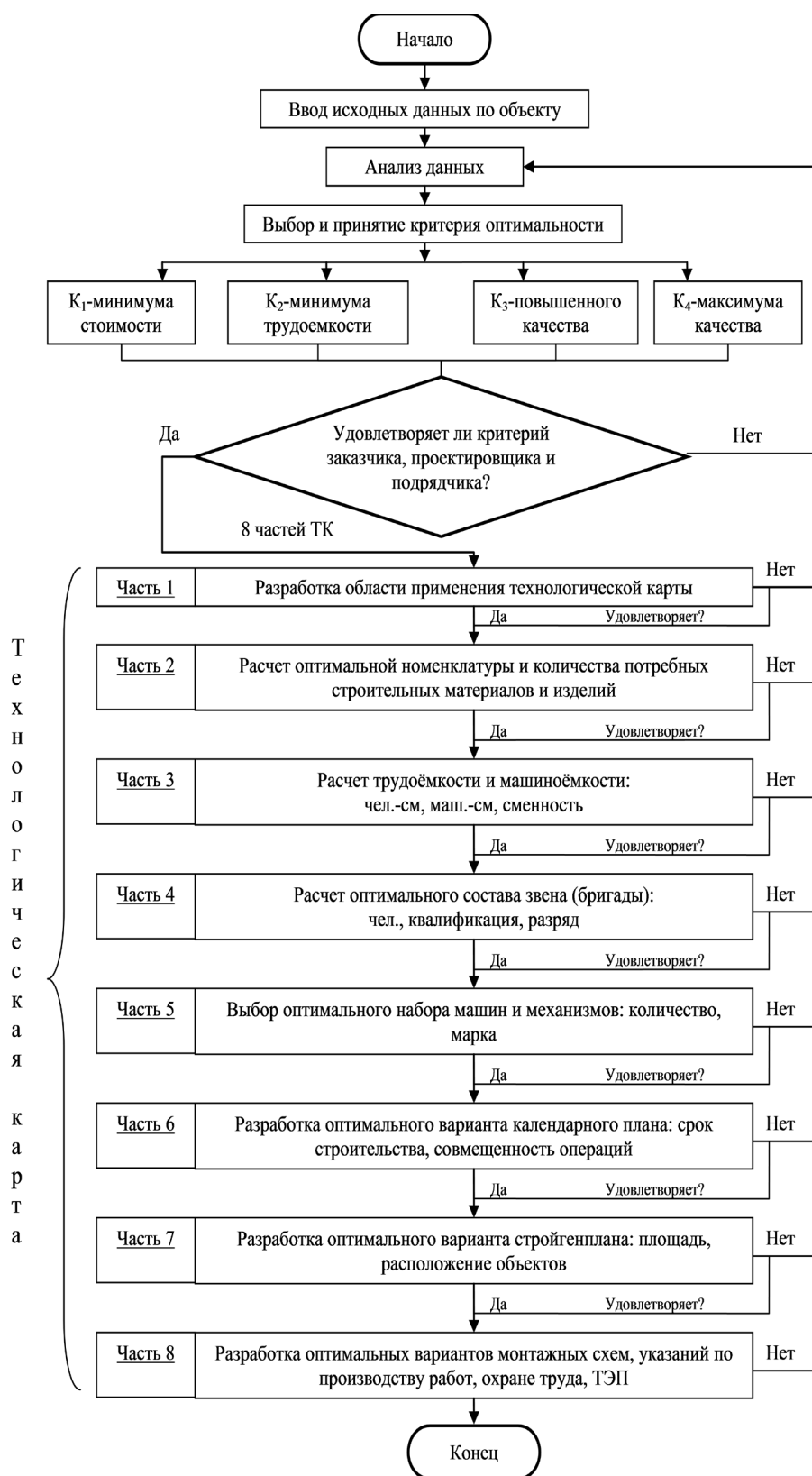


Рисунок 1. Теоретические основы разработки оптимального варианта технологического решения на монтаж НВФ методом пошаговой многокритериальной оптимизации

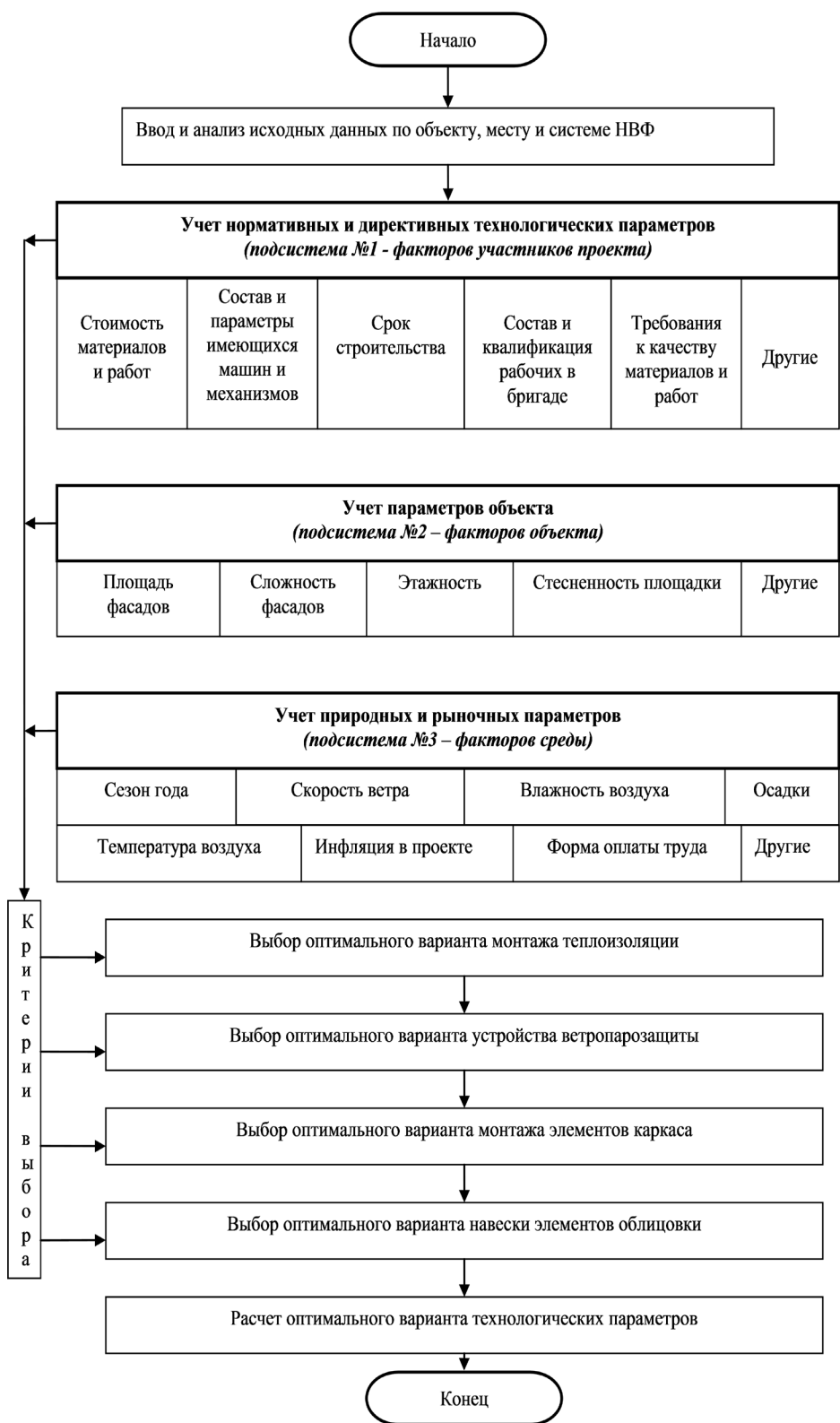


Рисунок 2. Алгоритм разработки оптимального варианта технологического регламента на монтаж НВФ методом пошаговой многокритериальной оптимизации

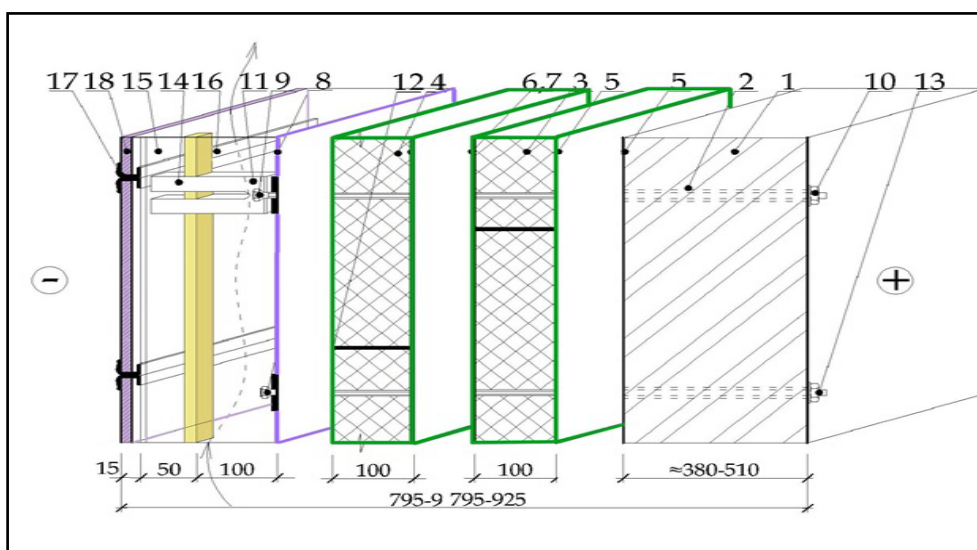


Рисунок 3. Технология устройства НВФ по варианту № 4 по критерию оптимизации К4 «максимального качества» (рекомендуется применять при отсутствии ограничений на финансовые и трудовые ресурсы): 1 – кладка из кирпича керамического; 2 – сверление отверстий под болты; 3, 4 – монтаж 2 слоев минераловатной плиты с нахлестом; 5-8 – закрепление мембраны «Тувек»; 9, 12 – установка сквозных болтов; 10, 13 – установка гаек; 11, 15 – монтаж горизонтальных и вертикальных направляющих, нержавеющая сталь; 14 – установка связей; 16 – оставление зазора; 17 – установка фигурных нащельников; 18 – навеска гранитных плит

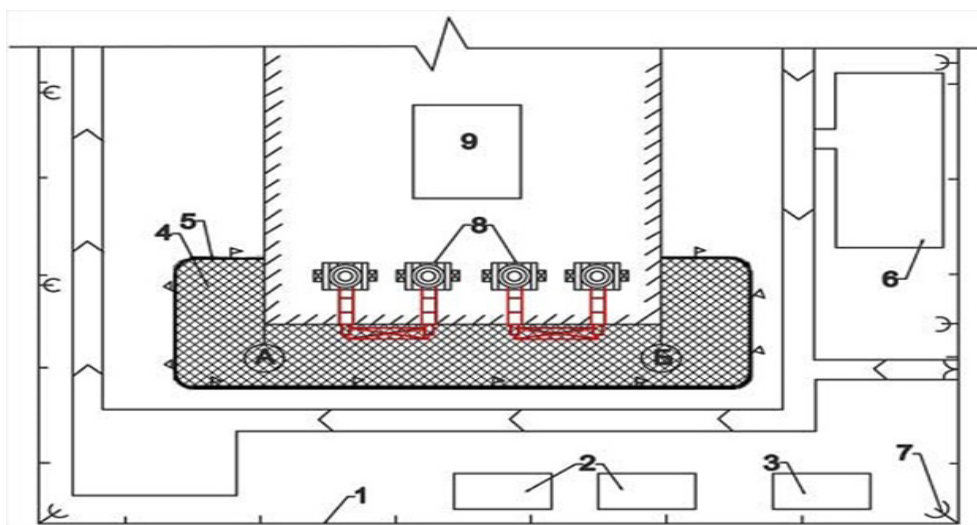


Рисунок 4. Схема организации строительной площадки при устройстве рационального решения НВФ с минимумом затрат в многоквартирном доме: 1 – ограждение строительной площадки; 2 – мастерская и санитарно-бытовое помещение для рабочих; 3 – материально-технический склад; 4 – рабочая зона; 5 – граница зоны, опасной для нахождения людей при эксплуатации фасадных подъемников; 6 – открытая площадка складирования плит минваты, пленка элементов каркаса, облицовочных панелей; 7 – мачта освещения; 8 – 2 фасадных подъемника; 9 – жилой дом с НВФ

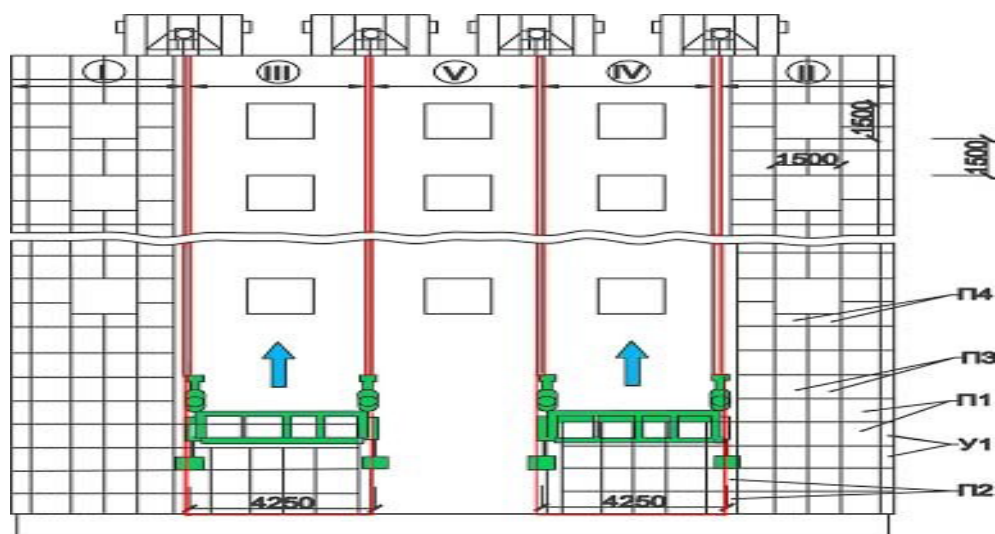


Рисунок 5. Схема разбивки фасада на вертикальные захваты при устройстве рационального решения НВФ с минимумом затрат в многоквартирном доме: ↑ – направление производства работ; I, III, V – вертикальные захваты для 1-го и 2-го звеньев монтажников, работающих на первом фасадном подъемнике; II, IV – вертикальные захваты для 3-го и 4-го звеньев монтажников, работающих на втором фасадном подъемнике; Облицовочные панели: П1 – 1000x900, П2 – 1000x700, П3 – 1000x750, П4 – 750x500, У1 – 1000x200

Это позволило далее выполнить сравнительный анализ технологических параметров 4-х усовершенствованных способов устройства НВФ (таблица 1).

Таблица 1. Сравнительный анализ технологических параметров 4-х усовершенствованных способов устройства НВФ.

Параметр	Вариант № 1 – минимум стоимости	Вариант N 2 – минимум затрат труда	Вариант N 3 – повышенное качество	Вариант N 4 – максимум качества
Область применения - вид дома	индивидуальные, социальные	социальные	коммерческие	элитные
Несущая стена	монолитный бетон	сборный железобетон	монолитный железобетон	керамический кирпич
Каркас	сталь	сталь оцинкованная	сталь нержавеющая	сталь нержавеющая
Утеплитель	2 слойная минвата	2 слойная минвата	3 слойная минвата	3 слойная минвата
Навесная облицовка	виниловый сайдинг, кассеты	крупные фиброцементные, фасадные панели	керамогранитные плиты	гранитные плиты
Крепеж каркаса	пластмасса, зонтичные дюбели	оцинкованная сталь, анкерные саморезы	нержавеющая сталь, анкерные саморезы	нержавеющая сталь, болты
Звено, человек	1-2	1-2	2-3	2-3
Трудоемкость монтажа, чел.- см. на 1 кв. м фасада (средние рассчитанные результаты)	0,62	0,52	1,31	1,89
Стоимость, тыс.руб/ кв.м	2,17	3,12	3,1	3,95
Крепеж утеплителя	клей	пластмасса, зонтичные клеммеры	сталь, зонтичные саморезы	сталь, болты
Показатель технологичности	0,662	0,655	0,650	0,645

На рисунке 6 показана одна из выявленных и исследованных важных зависимостей - уменьшения трудоемкости монтажа НВФ от фактора влияния «увеличения площади единицы навесной облицовки».

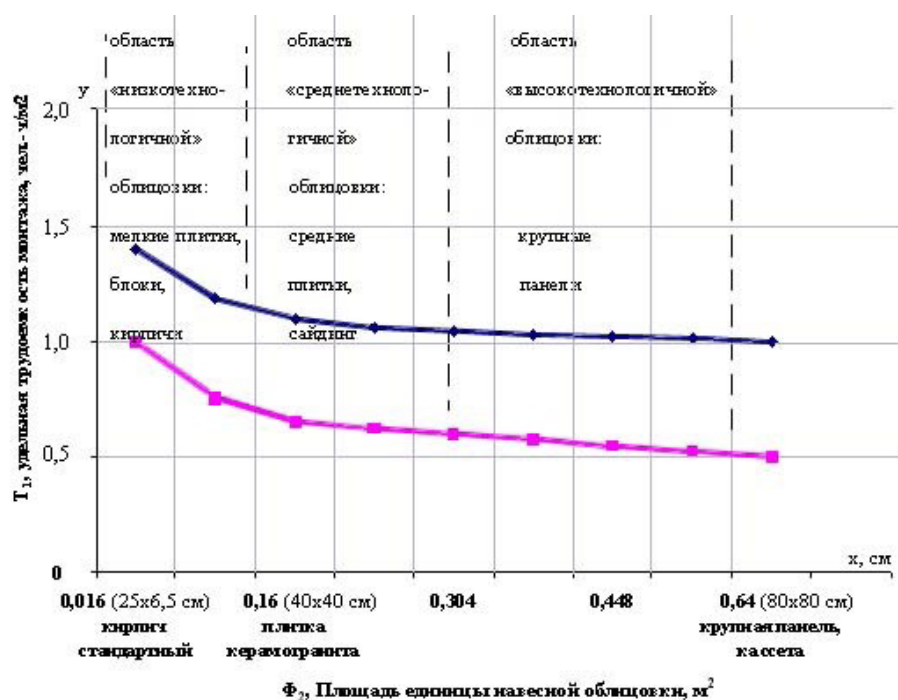


Рисунок 6. Зависимость уменьшения трудоемкости монтажа НВФ от фактора влияния – увеличения площади единицы навесной облицовки: верхняя кривая – производственные значения по результатам замеров в процессе строительства, нижняя кривая – теоретические значения

В заключении была выполнена оценка технологичности применения разработанных усовершенствованных способов устройства НВФ с системным учетом следующих 5 видов технологичности на всех стадиях их жизненного цикла с учетом материалов (Badjin и др., 2015; Badjin и др., 2013; Sychev, Sharipova, 2015; Сычев, Казаков, 2015).

1. **Технологичность изготовления элементов НВФ** – характеристика подсистемы изготовления конструкций НВФ, отвечающая таким 9 критериям, как разнотипность, общее количество элементов, материалоемкость, трудоемкость, деформации и напряжения, механизация технологических процессов, точность геометрических форм, крупность элементов, сборка и готовность.

2. **Транспортная технологичность** – характеристика подсистемы транспортирования изделий НВФ, отвечающая таким 6 критериям, как разнотипность, разновесность, стоимость транспорта, укрупнение отправочных элементов, загрузка подвижного состава транспортного средства, механизация погрузки и разгрузки.

3. **Технологичность монтажных работ** – характеристика подсистемы монтажа конструкций НВФ, отвечающая таким 10 критериям, как трудозатраты, выполнение мокрых процессов, деформации и напряжения, механизация процессов, скорость выполнения работ, однородность ячеек здания, однородность участков захваток и ярусов, однородность конструктивных элементов, удобство сборки сварки, учет допусков.

4. **Эксплуатационная технологичность** – характеристика НВФ в подсистеме эксплуатации с учетом требований удобства обслуживания, затрат по эксплуатации, экономии энергоресурсов и автоматизации, трудоемкости и минимизации затрат на отопление.

5. **Технологичность модернизации и реконструкции** – характеристика подсистемы с учетом показателей: улучшение технических свойств жилого дома, дальнейшее повышение теплозащиты стен при принятии новых норм, замена устаревшей облицовки на новые виды, объемно-планировочные изменения, применение новых технологий, новых механизмов и оборудования так, чтобы здание удовлетворяло современным требованиям безопасности и комфорта проживания людей.

При этом под **общей технологичностью устройства НВФ** предлагается понимать *степень простоты, доступности, быстроты и легкости реализации типовыми средствами механизации и небольшим звеном*

рабочих средней квалификации совокупности конструктивно-технологических решений возведения фасадов жилых домов, их эксплуатации, дальнейшей модернизации и реконструкции, отвечающих современным требованиям к качеству, безопасности и интенсивности выполнения строительных процессов и операций.

Рассчитанные значения интегральных критериев технологичности оказались равны 0,665, 0,654, 0,652 и 0,650 для 4-х вариантов технологий, что соответствует высокой степени простоты, экономичности и индустриальности выполняемых строительно-монтажных работ.

Заключение

На основе проведенного исследования были сделаны следующие выводы:

1. Показано, что новыми рациональными решениями НВФ, адекватными различным типам строящихся жилых домов в России, являются варианты выполнения следующих последовательных и комплексно-механизированных операций:

(1) Закрепление теплоизоляции (крупноразмерные минерало (стекло) ватные жесткие плиты на несущей стене анкерами;

(2) Установка паро- и ветрозащитных мембран (полиэтиленовые и специальные пленки);

(3) Монтаж каркаса – вертикальных и горизонтальных профилей (оцинкованная или нержавеющая сталь на саморезах с анкерным и фрагментарно болтовым креплением по расчету к несущей стене;

(4) Навеска наружных облицовочных панелей с оставлением воздушного зазора по расчету (листы винилового сайдинга, керамический сайдинг, фиброцементные листы, кассеты, плиты керамогранит).

2. Методами системного синтеза и моделирования разработаны новые теоретические модели, алгоритмы и рекомендации для проектирования новых рациональных технологий устройства НВФ. Модели могут быть использованы в практике разработки проектов организации строительства и проектов производства работ в проектных и подрядных организациях. Обоснована новая многофакторная модель комплексного влияния наиболее значимых факторов (массы и размеров плит утеплителя, навесных панелей, элементов стального каркаса и крепежа, толщины воздушного зазора, высоты здания, погодных условий) на оптимизацию технологических параметров (трудоемкость, затраты машинного времени, крановое оборудование, стоимость, технологичность).

3. Методами вариантного технологического проектирования и многокритериальной оптимизации разработаны 4 оптимизированных варианта для технологических решений монтажа теплоизоляционных, каркасных и облицовочных элементов в системах НВФ с учетом 4 наиболее важных потребительских критериев оптимальности: минимума затрат труда и машинного времени, минимума стоимости, повышенного качества и максимума качества и безопасности. Научная значимость результатов состоит в том, что выявлены и исследованы основные факторы, влияющие на оптимизацию технологических режимов устройства различных видов НВФ; их использование позволяет снизить трудоемкость работ до 0,55 - 1,88 чел.-см. на 1 кв. м площади фасада.

4. Установлены новые и важные для снижения трудоемкости и стоимости работ и для повышения простоты и технологичности работ зависимости увеличения затрат труда от увеличения площади монтируемых элементов НВФ, их веса и других факторов влияния с критериями оптимальности минимума стоимости, трудоемкости и максимума качества. Методами математической статистики рассчитаны математические модели, которые аппроксимируют выявленные зависимости. Методом замеров на объектах определены важные новые зависимости снижения производительности труда при устройстве НВФ от влияния наиболее важных природно-климатических факторов – низких отрицательных температур и скорости ветра. Установлены новые и важные для рациональной организации работ по комплексно-механизированному монтажу зависимости изменения затрат труда и стоимости от наиболее важных факторов влияния - изменения площади фасада, веса и размеров устанавливаемых конструктивных элементов, видов узлов их соединения.

5. Исследование технологичности применения рациональных способов устройства НВФ с помощью методов экспертного оценивания доказало достаточно высокий уровень технологичности разработанных решений с комплексным учетом как заводской, транспортной, монтажной и эксплуатационной технологичности, так и технологичности модернизации и реконструкции. При этом интегральный критерий технологичности разработанных вариантов НВФ оказался равным 0,665-0,650, что соответствует высокой степени простоты, экономичности и индустриальности выполняемых строительно-монтажных работ и способствует повышению общей эффективности процесса возведения жилья.

6. Опыт использования разработанных технологий НВФ с рациональными решениями в 2010-2016гг. в строительных компаниях Санкт-Петербурга показал достаточную сходимость теоретических расчетных показателей эффективности с практическими оценками по фактам экспериментально строительства и эксплуатации. При этом обоснованные варианты технологии работ с рациональными параметрами НВФ отличаются от традиционных способов устройства следующими преимуществами: более экономичным

расходом доступных строительных материалов, меньшей трудоемкостью, простотой выполнения рабочих операций, меньшей приведенной стоимостью с учетом стадии эксплуатации с ремонтами. К конкурентным достоинствам на рынке строительных работ является то, что разработанные варианты технологий позволяют вести работы звеном всего из 2-3 рабочих – монтажник и облицовочник, со средней квалификацией (3-5 разрядом), практически круглогодично, в т.ч., при отрицательной температуре по данным.

7. Полученные результаты можно также использовать при разработке новых конструкций сэндвич-панелей, у которых уже на заводе произведено закрепление навесного фасада или его части. Это повысить скорость строительства и его качество, т.к. монтаж фасада на высоте и при плохой погоде очень трудоемок.

Литература

Badjin, G., Sychev, S., Kazakov, Y., Judina, A. (2015). Improving Technology of Constructing Pre-Fabricated Buildings in the Conditions of Northern Regions. *Applied Mechanics and Materials*, 725-726, pp. 100–104. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.100.

Badjin, G.M., Sychev, S.A., Pavlova, N. A. (2013). Energy-economic house: Energy-Efficient construction technologies. *Transmit World*, 2(1). Available at: <https://transmitworld.wordpress.com/archives/> (accessed on: 02.02.2017)

Burton, S. (2014). *Sustainable Retrofitting of Commercial Buildings: Cool Climates*. Abingdon: Routledge.

De Gracia, A., Navarro, L., Castell, A., Ruiz-Pardo, A., Álvarez, S., Cabeza, L. (2013). Thermal analysis of a ventilated facade with PCM for cooling applications. *Energy and Buildings*, 65, pp. 508–515.

Godish, T. (2001). *Indoor Environmental Quality*. Florida: CRC Press LLC.

Hegger, J., Kulas, C., Horstmann, M. (2012). Spatial Textile Reinforcement Structures for Ventilated and Sandwich Facade Elements. *Advances in Structural Engineering*, 15(4), pp. 665-675. DOI: 10.1260/1369-4332.15.4.665.

Knaack, U., Klein, T., Bilow, M., Auer, T. (2014). *Facades: Principles of Construction*. 2nd and revised edition. Berlin: Birkhauser.

Sychev, S., Sharipova, D. (2015). Monitoring and Logistics of Erection of Prefabricated Modular Buildings. *Indian Journal of Science and Technology*, 8(29), pp. 1–6. DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i29/84114.

Tusnina, V., Emelyanov, A., Tusnina, O. (2014). A Joint of Ceramic Granite Mount by Threaded Anchor Studs in a Suspended Ventilated Facade. *Applied Mechanics and Materials*, 578-579, pp. 615–618. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.578-579.615

Vorob'ev V., Zapashchikova, N. (2015). Structural assessment of suspended facade systems as a tool for energy-savings and increase in energy efficiency of buildings. *Naukovedenie*, 7(3), pp. 1-11. DOI: 10.15862/99TVN315.

Казаков, Ю.Н. (2011). *Как построить дом: быстро и дешево*. СПб: «Питер», с.304.

Пискун, А.Е., Казаков Ю.Н. (2008а). *Научное обоснование рациональных технологических решений применения НВФ для строительства зданий*. Белгородский гос. технолог. унив-т им. В.Г.Шухова: Изд-во БГТУ, с. 198–204.

Пискун, А.Е., Казаков Ю.Н. (2008б). Рациональные технологические параметры устройства навесных вентилируемых фасадов. *Вестник гражданских инженеров*, 4, с.25–29.

Сычев С.А., Казаков Ю.Н. (2015). Высокоскоростная модульная система строительства. В: *материалах 3-й Международной Конференции «Экономические аспекты управления строительным комплексом в современных условиях»*. Самара, с.183–187.

Сычев С.А., Казаков Ю.Н. (2015). Домостроительная система «Сокол». В: *материалах 1-й Международной конференции «Современные тенденции развития науки и технологии»*. Белгород.

ВИБРОАКТИВАТОРЫ В ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Виктор Кузьмичев¹, Владимир Верстов²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия, 195251
г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29

² Санкт-Петербургский Государственный Архитектурно-Строительный Университет,
Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская ул., д.4

kuzmichev_va@mail.ru¹, 5750195@mail.ru²

Аннотация

В статье представлены методы проектирования оригинальных конструкций виброактиваторов на базе уравновешенных эксцентриковых вибровозбудителей, которые могут использоваться в конструкциях смесителей, дозаторов и другого технологического оборудования с целью повышения интенсивности и эффективности их работы.

Общеизвестным достоинством их является неизменность амплитуды колебаний, что обеспечивает в сочетании с постоянной частотой стабильную интенсивность вибрационных воздействий на обрабатываемый материал независимо от его структурно-реологических свойств (гранулометрического состава, типа вяжущего и т. п.).

Отличительным достоинством, имеющим важное значение с точки зрения виброизоляции машины, рассматриваемых вибровозбудителей от известных, является уравновешенность колеблющихся масс и, как следствие, снижение динамических нагрузок на внешние объекты.

Представлены: описание особенностей конструкций; рассмотрен процесс взаимодействия с обрабатываемой средой обнаруживающий следующее свойство эксцентриковых уравновешенных виброактиваторов: статическая (динамическая) балансировка системы, проведенная в воздухе, не нарушается при погружении виброактиватора в смесь. Подробно представлены методы балансировки вибровозбудителей на стадии проектирования с примерами расчетов.

Ключевые слова

Вибровозбудители, кинематическое возбуждение колебаний, методы проектирования, динамическая балансировка.

Введение

Развитие вибрационной техники характеризуется появлением вибрационных машин различного назначения и конструктивного исполнения. Разнообразие типов и модификаций вибрационных машин, а также условий их использования обуславливает наличие ряда специфических требований к принципиальному устройству, конструктивному выполнению и эксплуатационным характеристикам их приводов — вибровозбудителей. (Белокобыльский и др., 2008; Бауман, Быховский, 1977; Верстов и др., 2013; Челомей, 1981а; Челомей, 1981б; Ден-Гартог, 1960; Емельянова, 2009).

По конструкции типы вибровозбудителей (вibrаторов) подразделяются на четыре основные группы: инерционные (дебалансные, центробежные), кривошипно-шатунные (эксцентриковые), электромагнитные и поршневые (пневматические и гидравлические) (Ефремов, Лобанов, 2008; Ефремов, 2011а; Ефремов, 2011б).

При проектировании вибрационных машин и оборудования целесообразно использовать метод **внутренней виброзащиты объекта**, позволяющий снизить уровень вибрации на окружающую среду, с одной стороны, и максимально использовать вибрационные воздействия на обрабатываемый материал, с другой.

Ниже рассматриваются конструкции и методы проектирования уравновешенных эксцентриковых виброактиваторов, в дальнейшем вибровозбудителей, принудительные колебания которых осуществляются за счет использования плоской кинематической вращательной пары выполненной в виде колена (кривошипа либо эксцентриковой втулки), как показано на рисунке 1.

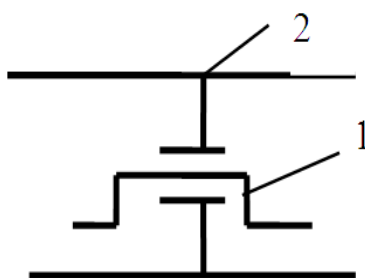


Рисунок 1. Эксцентровая кинематическая пара: 1 - кривошип, 2 - корпус вибровозбудителя

Эксцентровые вибровозбудители относятся к вибровозбудителям с кинематическим возбуждением колебаний.

Общеизвестным достоинством их является неизменность амплитуды колебаний, что обеспечивает в сочетании с постоянной частотой стабильную интенсивность вибрационных воздействий на обрабатываемый материал независимо от его структурно-реологических свойств (гранулометрического состава, типа вяжущего и т. п.).

Отличительным достоинством, имеющим важное значение с точки зрения виброизоляции машины, рассматриваемых вибровозбудителей от известных является уравновешенность колеблющихся масс и, как следствие, снижение динамических нагрузок на внешние объекты (привод, корпус, обслуживающий персонал, строительные конструкции и т. п.).

Описание конструкций

Конструкция вибровозбудителя включает следующие основные элементы: несущий приводной коленчатый вал, установленный в коренных подшипниках; корпус, опирающийся на шатунные подшипники, установленные через посредство эксцентриковых (эксцентровой) втулок на несущем приводном валу, и противовесы, обеспечивающие динамическую балансировку. (Кузьмичев, 2013; Романовский; 2010; Серебренников, Кузьмичев, 1999; Vanfill и др., 2011).

Принципиальные схемы вибровозбудителей представлены на рисунке 2.

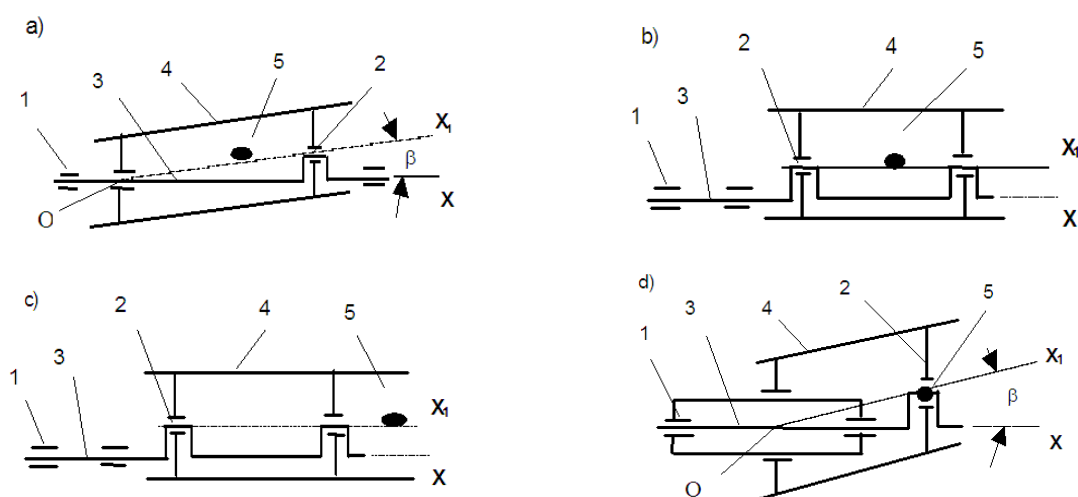


Рисунок 2. Схемы типовых вибровозбудителей: а) межопорный, прецессирующий, четырехопорный;

б,с) консольный, плоскопараллельный, четырехопорный; д) консольный, прецессирующий, трехопорный.

1.—коренные подшипники 2.—шатунные подшипники; 3.—приводной вал; 4.—корпус вибровозбудителя; 5.—центр тяжести колеблющихся масс. X – ось вращения вибровозбудителя; X_1 – главная центральная ось инерции корпуса вибровозбудителя

Корпус эксцентрикового вибровозбудителя совершает сложное вращательное движение, состоящее из переносного формирующегося вращением приводного коленчатого вала вокруг оси X и относительного вращения вокруг оси симметрии X_1 . Если оси X и X_1 переносного и относительного вращений параллельны, движение вибратора будем называть плоскопараллельным. В случае, если ось симметрии X_1 пересекается в точке «О» с осью X , движение вибратора называется прецессирующим. В таких вибровозбудителях, в дальнейшем называемых прецессирующими, при вращении коленчатого вала корпус вибратора совершает движение, называемое регулярной прецессией с углом нутации β .

В отличие от гироскопов угловая скорость вращения корпуса эксцентрикового вибровозбудителя вокруг оси симметрии X_1 значительно меньше угловой скорости вращения вокруг оси X .

Подшипники, через центры которых проходит ось X вращения коленчатого вала, будем называть коренными 1; подшипники, установленные вдоль оси X_1 относительного вращения вибратора – шатунными 2. Вибровозбудители будем называть межопорными, если колеблющаяся масса, установленная на шатунные подшипники, расположена между коренными подшипниками (рисунок 2а); консольными, если она расположена за одной из крайних коренных опор (рисунок 2б,с). При проектировании возможны варианты: центр тяжести колеблющихся масс расположен между шатунными подшипниками, либо за крайней шатунной опорой. Консольные вибровозбудители прецессирующего типа целесообразно проектировать трехопорными. В этом случае шатунный подшипник располагается в точке приложения равнодействующей центробежных сил инерции, а вторая опора, выполняемая в виде упругого элемента, между коренными подшипниками (рисунок 2д).

Вибровозбудителям плоскопараллельного типа свойственна статическая неуравновешенность, вибровозбудителям прецессирующего типа – динамическая неуравновешенность. Под уравновешенностью (статической либо динамической) понимается такое состояние вибровозбудителя, как технической системы в процессе работы, при котором реакции в коренных подшипниках от центробежных сил и моментов равны нулю, т.е. степень передачи динамических нагрузок на поддерживающие опоры, фундамент, привод мала.

В реальных конструкциях вибровозбудителей невозможно полностью устранить неуравновешенность. Поэтому с достаточной степенью точностью для практики можно полагать, что коэффициент неуравновешенности, равный отношению максимальной центробежной нагрузки в коренном 1 подшипнике к ее величине в шатунном 2 подшипнике, должен составлять 0,01...0,02. Однако определить коэффициент неуравновешенности при проектировании с учетом погрешностей геометрических размеров при изготовлении элементов конструкции вибровозбудителя и плотности материала весьма трудно. Поэтому допустимая неуравновешенность может определяться наибольшей амплитудой колебаний корпуса (рамы) вибрационной машины. Величину амплитуды колебаний определяют из условия $A\omega^2 \leq 0,5g$, где A , ω – соответственно частота и амплитуда колебаний корпуса (рамы) вибрационной машины.

Методология

Рассмотрим работу вибровозбудителя в среде (рисунок 3).

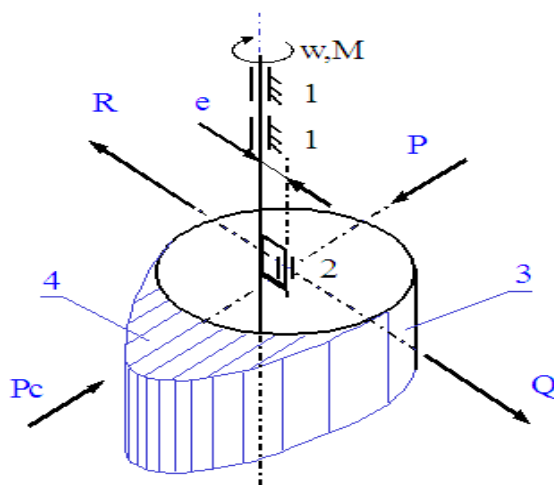


Рисунок 3 Схема сил, действующих на вибровозбудитель, погруженный в смесь:

1,2,3 - соответственно коренной и шатунный подшипники, корпус вибровозбудителя; 4 - эпюра сил лобового сопротивления среды; M - момент внешних сил (на приводном валу); e - эксцентриситет (амплитуда колебаний); Q - центробежная сила, возникающая при вращении неуравновешенных масс; R - центробежная сила, возникающая при вращении противовеса; - движущая сила, приложенная в шатунном подшипнике; - сила сопротивления смеси (сила, препятствующая вращению вибровозбудителя в среде); - частота вращения приводного вала.

Вал вибровозбудителя вращается с постоянной угловой скоростью от электродвигателя. Момент, возникающий на валу вибровозбудителя, определяется суммой моментов внутренних сил (трением в подшипниках, уплотнениях т.п.) и момента внешних сил $M = eP_c$. P – движущая сила, приложенная в шатунном подшипнике, равная M/e и направленная под углом 90 градусов к кривошипу; Q – центробежная сила, направлена вдоль кривошипа; P_c – сила сопротивления среды, также приложена в шатунном подшипнике и повернута по отношению к центробежной силе на 90 градусов по часовой стрелке.

Для статической (динамической) уравновешенности системы, т.е. равенства нулю реакций в коренных 1 подшипниках необходимо, чтобы сумма всех внешних сил, действующих в шатунных (шатунном) 2 подшипниках (подшипнике), была равна нулю. Очевидно, что движущая сила P равна по значению силе P_c сопротивления среды и противоположна по знаку. Для уравновешивания центробежной силы Q необходимо установить противовесы, создающие равную по величине и противоположно направленную силу R . Вышесказанное можно записать в виде условия:

$$P = P_c; Q = R \quad (1)$$

Условие (1) обнаруживает следующее свойство эксцентриковых уравновешенных вибровозбудителей: *статическая (динамическая) балансировка системы, проведенная в воздухе, не нарушается при погружении вибровозбудителя в смесь.*

Метод балансировки вибровозбудителей

Метод балансировки виброактиваторов основывается на известных положениях уравновешивания роторов, которые всегда могут быть приведены в состояние динамического равновесия с помощью двух корректирующих масс, расположенных в двух произвольных плоскостях коррекции (Челомей, 1981б).

Задачу расчета составляют:

1. определение величины и места положения равнодействующей центробежных сил, возникающих при вращении неуравновешенных (колеблющихся) масс;

2. определение массы противовесов и места их размещения на несущем приводном валу, при которых обеспечивается статическая (динамическая) балансировка неуравновешенных масс.

Неуравновешенная масса - суммарная масса колеблющихся элементов конструкции вибровозбудителя, центр тяжести которых располагается на главной центральной оси инерции.

При проведении расчетов по пункту 1 с целью упрощения процесса конструирования вибровозбудителя и сокращения процедуры расчета рекомендуется не включать в состав неуравновешенных масс массу узлов шатунных подшипников.

Расчет по пункту №1

Неуравновешенную массу вибровозбудителя можно представить в виде суммы линейно распределенных и сосредоточенных масс по длине.

Типовые схемы для прецессирующих вибровозбудителей, как наиболее общие (возможные), представлены на рисунке 4.

Равнодействующие центробежных сил, возникающие в результате круговых колебаний корпуса, для представленных на рисунке 4 типовых схем определяются по нижеприведенным формулам:

$$Q_i = \int_{\ell} dQ_i = \int_{\ell} \omega^2 q_i (tg\beta) x dx \quad (2)$$

где dQ_i – элементарная центробежная сила.

После подстановки значений распределенных нагрузок в формулу (2) и интегрирования в соответствующих пределах получим:

$$\begin{aligned} \text{а) } q_i = const; Q_1 &= \omega^2 q_1 g \beta \int_0^l x dx = \frac{1}{2} \omega^2 q_1 l^2 g \beta \\ \text{б) } q_2 = const; Q_2 &= \omega^2 q_2 g \beta \int_{l_1}^{l_2} x dx = \frac{1}{2} \omega^2 q_2 (l_2^2 - l_1^2) g \beta \end{aligned}$$

$$в) q_3 = q^* \left(1 - \frac{x}{l}\right); Q_3 = \omega^2 q^* \operatorname{tg} \beta \int_0^l \left(1 - \frac{x}{l}\right) x dx = \frac{1}{6} \omega^2 q^* l^2 \operatorname{tg} \beta$$

$$г) q_4 = q^* \left(1 - \frac{x-l_1}{l-l_1}\right); Q_4 = \omega^2 q^* \operatorname{tg} \beta \int_{l_1}^l \left(1 - \frac{x-l_1}{l-l_1}\right) x dx = \frac{1}{6} \omega^2 q^* (l^2 + ll_1 - 2l_1^2) \operatorname{tg} \beta$$

$$д) q_5 = q^* \frac{x}{l}; Q_5 = \omega^2 q^* \operatorname{tg} \beta \int_0^l \frac{x}{l} x dx = \frac{1}{3} \omega^2 q^* l^2 \operatorname{tg} \beta$$

$$е) q_6 = q^* \frac{x-l_1}{l-l_1}; Q_6 = \omega^2 q^* \operatorname{tg} \beta \int_{l_1}^l \frac{x-l_1}{l-l_1} x dx = \frac{1}{6} \omega^2 q^* (2l^2 - ll_1 - l_1^2) \operatorname{tg} \beta$$

$$ж) Q_7 = \sum_{i=1}^n M_i l_i \omega^2 \operatorname{tg} \beta$$

Эпюры центробежных сил и точки приложения их равнодействующих для типовых схем распределенных нагрузок представлены на рисунке 5 (буквенные обозначения соответствуют типовым схемам рисунке 4).

Координата L_i точек приложения равнодействующих центробежных сил определяются по нижеприведенным формулам с учетом выражений (2):

$$L_i = \frac{\int_{\ell} dM_i}{Q_i} = \frac{\int_{\ell} x dQ_i}{Q_i} = \frac{\int_{\ell} \omega^2 q_i (\operatorname{tg} \beta) x^2 dx}{Q_i} \quad (3)$$

где dM_i – элементарный статический момент центробежных сил относительно точки O .

После подстановки в формулу (3) значений распределенных нагрузок, соответствующих им центробежных сил и интегрирования в заданных пределах имеем:

$$а) L_1 = \frac{2}{3} l$$

$$б) L_2 = \frac{2(l^3 - l_1^3)}{3(l^2 - l_1^2)}$$

$$в) L_3 = \frac{l}{2}$$

$$г) L_4 = \frac{1}{2} \frac{(l^3 + l^2 l_1 + l_1^2 - 3l_1^3)}{(l^2 + l_1 - 2l_1^2)}$$

$$д) L_5 = \frac{3}{4} l$$

$$е) L_6 = \frac{1}{2} \frac{(3l^3 - ll_1^2 - l_1^2 l - l_1^3)}{(2l^2 - ll_1 - l_1^2)}$$

$$\text{ж) } L_7 = \frac{\sum_{i=1}^n M_i l_i^2 \omega^2 \operatorname{tg} \beta}{Q_7}$$

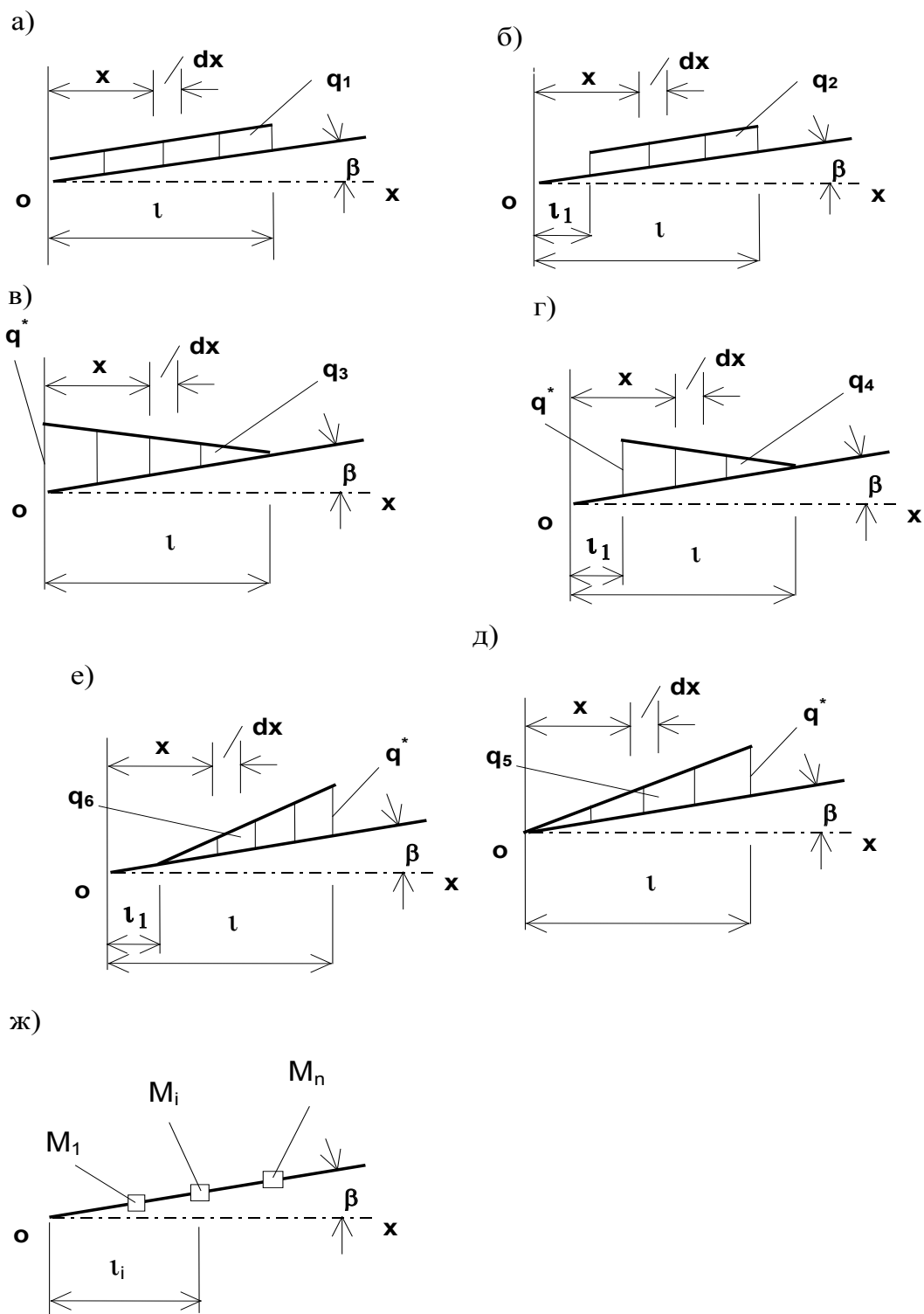


Рисунок 4. Типовые схемы распределенных и сосредоточенных масс:
 x – текущая координата; q_i – распределенная нагрузка; M_i – сосредоточенная масса; l – длина

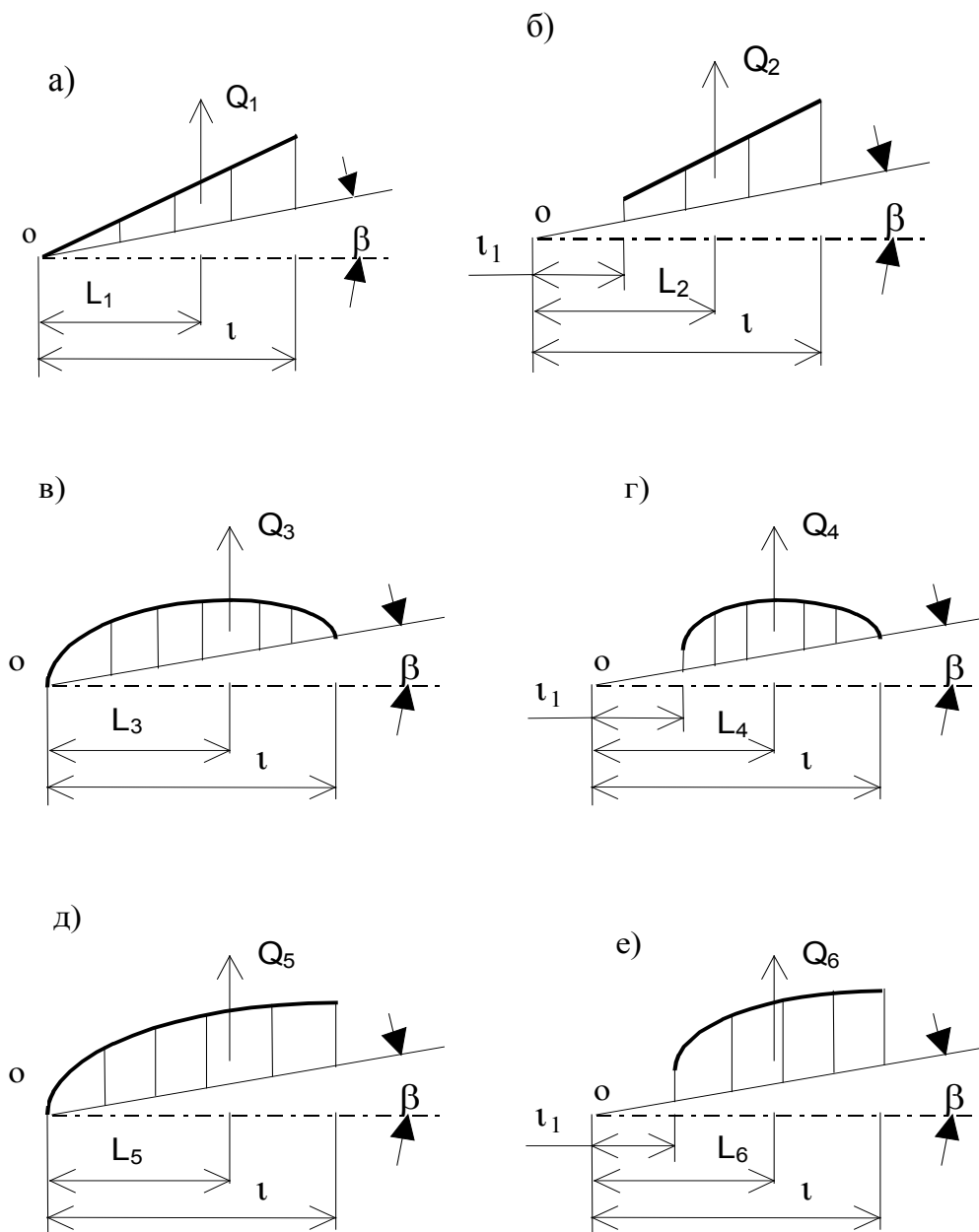


Рисунок 5. Типовые эпюры центробежных сил:

Q_i – равнодействующая центробежных сил; L_i – расстояние от (:) O до точки приложения равнодействующей центробежных сил

Пример

Пусть неуравновешенные элементы корпуса вибровозбудителя представлены в виде распределенных масс q_1 , q_2 и сосредоточенной массы M , как показано на рисунке 6.

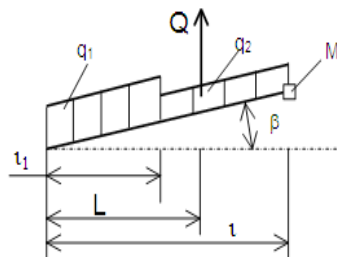


Рисунок 6. Расчетная схема

Применяя метод суперпозиций (метод независимости действия сил), определяется равнодействующая центробежных сил с учетом выражений 2 (а, б, ж):

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_7 = \omega^2 t \, g\beta \left(\frac{1}{2} q_1 l_1^2 + \frac{1}{2} q_2 (l^2 - l_1^2) + M l \right) \quad (4)$$

а точка ее приложения (расстояние L) с учетом выражений 3 (а, б, ж):

$$L = \frac{Q_1 L_1 + Q_2 L_2 + Q_7 L_7}{Q} = \frac{\omega^2 t g\beta \left(\frac{1}{3} q_1 l_1^3 + \frac{1}{3} q_2 (l^3 - l_1^3) + M l^2 \right)}{Q} \quad (5)$$

Одновременно с формулой 4 правомерно выражение:

$$Q = M_p \omega^2 L t g\beta, \quad (6)$$

где M_p – приведенная масса (масса неуравновешенных элементов корпуса вибровозбудителя, приведенная в точку приложения равнодействующей); $L t g\beta$ – величина эксцентриситета в точке приложения равнодействующей (амплитуда колебаний).

Сравнивая формулы (4) и (6) получим:

$$M_p = \frac{1}{L} \left(\frac{1}{2} q_1 l_1^2 + \frac{1}{2} q_2 (l^2 - l_1^2) + M l \right) \quad (7)$$

При использовании понятия приведенной массы вычисления упрощаются, так как в выражениях (4) и (5) можно не учитывать сомножитель $\omega^2 t g\beta$.

Представленные на рисунке 4 схемы распределенных масс практически охватывают все возможные варианты неуравновешенных элементов корпусов вибровозбудителей.

В случае, когда корпус вибровозбудителя совершает колебания с постоянной амплитудой (вибровозбудитель плоскопараллельного типа), расчет центробежной силы и точки ее приложения производится следующим образом:

- известными методами определяется неуравновешенная масса вибровозбудителя и положение ее центра тяжести - расстояние от торца корпуса;

- равнодействующая центробежной силы рассчитывается по формуле: $Q = m e \omega^2$, где e – величина эксцентриситета кривошипа (амплитуда колебаний); ω – угловая скорость вращения приводного коленчатого вала вибровозбудителя.

Расчет по пункту №2

В каждом отдельном случае при проектировании вибровозбудителей автор проекта имеет право выбора расположения плоскостей коррекции (места расположения противовесов) в зависимости от задачи конструирования. В этом смысле задача динамической балансировки является творческой задачей проектировщика с точки зрения проектирования рациональной конструкции вибровозбудителей.

Расчетные схемы динамической балансировки вибровозбудителей, соответствующие схемам на рисунках 2 (a, b, c, d) и на рисунке 7 (a, б, в, г).

Принцип построения расчетных схем состоит в следующем. Основная балка B (несущий приводной коленчатый вал вибровозбудителя), изображенная нижней линией, опирается на опоры 1 (коренные подшипники). На ней располагается вспомогательная балка A (корпус вибровозбудителя, неуравновешенная масса), изображенная верхней линией, которая опирается на опоры 2 (шатунные подшипники).

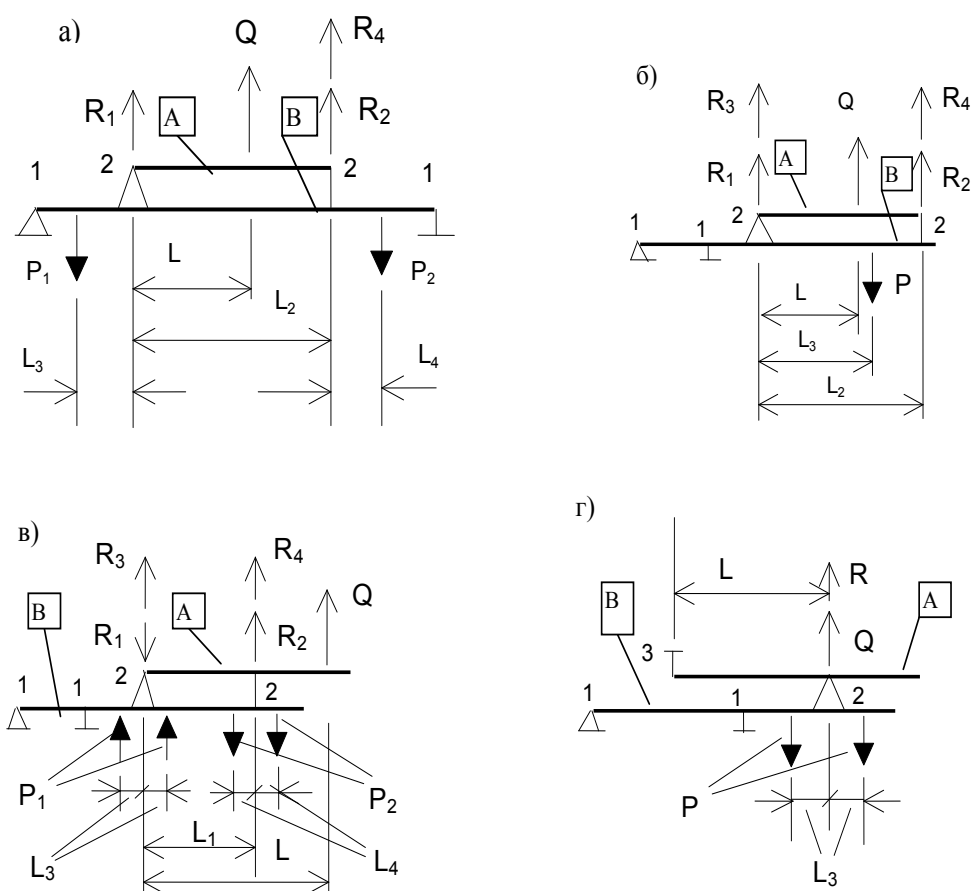


Рисунок 7. Расчетные схемы динамической балансировки

Центробежные нагрузки, возникающие при вращении несущего приводного вала от неуравновешенных масс (корпуса вибровозбудителя), изображены в виде равнодействующей Q . R , R_3 , R_4 – центробежные нагрузки от узлов шатунных подшипников. R_1 , R_2 – центробежные нагрузки в шатунных подшипниках от центробежной силы Q . P , P_1 , P_2 – уравновешивающие силы (центробежные силы, возникающие при вращении противовесов, установленных на несущем приводном валу). Геометрические размеры L_i устанавливают связь между действующими силами.

Подлежат определению величины сил P , P_1 , P_2 и расстояния L_3 , L_4 , определяющие места расположения противовесов.

Последовательность расчета:

1. конструктивно определяются схема расположения противовесов (противовеса);
2. методами статики определяются центробежные нагрузки R_1 , R_2 в шатунных подшипниках от центробежной силы Q ;

3. определяются центробежные силы R, R_2, R_4 , возникающие в результате колебаний узлов шатунных подшипников, по формуле: $R = m_i e_i \omega^2$, где m_i – масса подшипникового узла; e_i – величина эксцентриситета втулки;

4. с учетом знака (направления сил) вышеперечисленные силы суммируются;

5. в соответствии с условиями статики определяются необходимые величины центробежных сил, развиваемых противовесами для обеспечения динамической балансировки, и места их установки;

6. выбираются геометрические размеры противовесов (противовеса) и определяется его масса, которые обеспечивают расчетную центробежную силу.

$$P = m^* y \omega^2, \quad (8)$$

где m^* – масса противовеса; y – расстояние от центра тяжести противовеса до оси вращения; ω – угловая скорость вращения вала вибровозбудителя.

Динамическая балансировка (уравновешенность вибровозбудителя) для приведенных примеров выполняется при следующих условиях:

$$\sum P_i = 0 \quad \sum M_i = 0$$

$$\text{а) } P_1 = R_1; \quad P_2 = R_2 + R_4; \quad P_1 L_3 = P_2 L_4$$

$$\text{б) } P = R_1 + R_2 + R_3 + R_4; \quad P L_3 = (R_2 + R_4) L_2$$

$$\text{в) } P_1 = 1/2(R_1 - R_3), \quad R_1 > R_3 \quad \text{симметричное расположение}$$

$$P_2 = 1/2(R_2 + R_4) \quad \text{противовесов}$$

$$-P_1 = 1/2(R_1 - R_3), \quad R_3 > R_1 \quad \text{симметричное расположение}$$

$$P_2 = 1/2(R_2 + R_4) \quad \text{противовесов}$$

(направление противоположное)

г) конструкция выполняется с одним шатунным подшипником, который устанавливается в точке приложения равнодействующей центробежных сил.

$$P = 1/2(Q + R) \quad \text{симметричное расположение противовесов}$$

При геометрической форме противовеса, соответствующей рисунку 8, основные расчетные параметры его определяются по следующим формулам:

$$y = \frac{2}{3\pi} \frac{D^2 + Dd + d^2}{D + d}; \quad F = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{8}; \quad \delta = \frac{m^*}{F\rho} \quad (9)$$

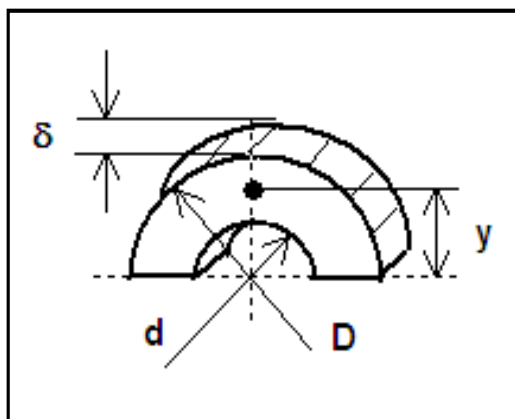


Рисунок 8. Противовес:

D – наружный диаметр; d – внутренний диаметр; δ – толщина; y – центр тяжести

Задаваясь внешним и внутренним диаметрами противовесов, рассчитывается необходимая толщина противовеса.

При получении неудовлетворительных результатов с точки зрения компоновки противовесов в корпусе вибровозбудителя (предположим - невозможности их конструктивного размещения) изменяются плоскости коррекции либо конструкция корпуса вибровозбудителя и расчет повторяется. В этом смысле задачи проектирования характеризуются методом последовательных приближений к получению желаемого результата.

Рекомендуется при освоении производства вибровозбудителей колеблющиеся детали опытного образца изделия взвесить и сравнить с расчетными данными. В случае расхождения расчетных и фактических масс более 2 процентов уточняется масса противовеса (противовесов).

Заключение

Разработаны методы проектирования виброактиваторов на базе уравновешенных эксцентриковых вибровозбудителей, отвечающих требованиям долговечности и надежности. Они могут использоваться в конструкциях смесителей, дозаторов и другого технологического оборудования с целью повышения интенсивности и эффективности их работы. В публикациях (Кузьмичев, 2013; Kuzmichev, Lyalinov, 2015) представлены результаты использования виброактиваторов в процессах смешивания строительных материалов.

Литература

Banfill, P.F.G., Teixeira, M.A.O.M., Craik, R.J.M. (2011). Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation. *Cement and Concrete Research*, 41(9), pp. 932–941.

Kuzmichev, V., Lyalinov, A. (2015). Theory and Practice of Functioning Machines for Vibratory Agitation. *Applied Mechanics and Materials*, 725–726, pp. 590–595. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.590

Бауман, В.А., Быховский, И.И. (1977). *Вибрационные машины и процессы в строительстве*. Москва: Высшая школа, с.265.

Белокобыльский, С.В., Кашуба, В.Б., Ситов, И.С. (2008). Повышение прочностных характеристик бетонного изделия обработкой его поверхности высокочастотным рабочим органом бетоноотделочной машины. *Вестник машиностроения*, 1, с.83–85.

Блехман, И.И. (1994). *Вибрационная механика*. Москва: Физматлит, с.400.

Верстов, В.В., Тишкин, Д.Д., Романовский, В.Н. (2013). Совершенствование технологии бесподкладочного монтажа промышленного оборудования. *Монтажные и специальные работы в строительстве*, 7, с.27–31.

Ден-Гартог, Дж.П. (1960). *Механические колебания*. Москва: Гос.изд-во физ.-мат.литер., с. 600.

Емельянова, И.А., Гордиенко, А.Т., Блажко, В.В., Анищенко, А.И. (2009). Бетоносмесители принудительного действия с новым принципом перемешивания компонентов строительных смесей. *Науковий вісник будівництва*, 54, с. 190–195.

Ефремов, И.М., Лобанов, Д.В. (2008). Новые роторные смесители с различными системами вибровозбуждения. *Строительные и дорожные машины*, 9, с. 7–9.

Ефремов, И.М., Лобанов, Д.В. (2009). Вибробетоносмесители: путь длиной в 70 лет. *Строительные и дорожные машины*, 10, с.15–19.

Ефремов, И.М., Лобанов, Д.В., Фигура, К.Н. (2011а). Механическая активация бетонных смесей при интенсификации процессов. *Механизация строительства*, 2, с. 6–8.

Ефремов, И.М., Лобанов, Д.В., Фигура, К.Н. (2011б). Современные технологии интенсификации процессов перемешивания бетонных смесей. *Строительные и дорожные машины*, 1, с. 37–41.

Кузьмичев, В.А. (2013). *Основы проектирования вибромиксеров*. LAP LAMBERT Academic Publishing, с.136.

Романовский, В.Н. (2010). Повышение эффективности монтажной подливки массивного оборудования за счёт дополнительного вибрационного воздействия на бетонную смесь. В: *сборнике 63ой Международной науч.-технич. конф. молодых ученых, аспирантов, докторантов и студентов*. СПб: СПбГАСУ, с.212–214.

Серебрянников, А.А., Кузьмичев, В.А. (1999). *Вибрационные смесители (конструкции, исследования, расчеты)*. Москва: Издательство "Недра", с.148.

Челомей, В.Н. (1981). *Вибрация в технике. Справочник в 6 томах. Том 4*. Москва: Машиностроение, с.456.

Челомей, В.Н. (1981). *Вибрация в технике. Справочник в 6 томах. Том 6*. Москва: Машиностроение, с.509.

ОБОСНОВАНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ ЗАМЕН УЗЛОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН ПО ЗАДАННОМУ УРОВНЮ НАДЕЖНОСТИ

Сергей Репин¹, Андрей Зазыкин², Наталья Кротова³

^{1,2,3} Санкт-Петербургский Государственный Архитектурно-Строительный Университет, Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-ая Красноармейская ул., д.4

repinserge@mail.ru¹, a.v.zazykin@mail.ru², nata.krotova@list.ru³

Аннотация

В статье представлены результаты исследований в области обеспечения работоспособности сложных технических объектов на примере экскаваторов. Рассмотрены методы определения периодичности замены элементов в соответствии с принятой в настоящее время прогрессивной стратегией эксплуатации - по техническому состоянию, в соответствии с текущим уровнем надежности, определяемому по статистическим или параметрическим характеристикам заменяемых узлов. Замена производится до наступления предельных значений характеристик. Параметрические характеристики измеряются в процессе диагностирования состояния узлов, а статистические определяются исходя из эксплуатационной информации.

Ключевые слова

Строительные машины, надежность, эксплуатация, техническое состояние, ремонт.

Введение

Обеспечение работоспособности сложных технических объектов, к которым относятся и строительные машины (СМ), в частности экскаваторов, осуществляется посредством технических обслуживаний и ремонтов (ТОР). Поскольку, ресурс машины в целом многократно превышает ресурс входящих в ее состав узлов, то в процессе проведения ТОР производится замена израсходовавших свой ресурс элементов. Замена производится в соответствии с принятой в настоящее время прогрессивной стратегией эксплуатации - по техническому состоянию (ТС). Оценка ТС проводится по текущему уровню надежности, определяемому по статистическим или параметрическим характеристикам заменяемых узлов. Замена производится до наступления предельных значений характеристик.

Параметрические характеристики измеряются в процессе диагностирования состояния узлов, например, объемный КПД насоса. Однако, не все узлы имеют измеряемые параметры, например, рукава высокого давления гидросистемы. Такие элементы заменяются на основании статистических характеристик.

Предельные значения показателей уровня надежности и параметров ТС элементов выбираются с учетом типа объекта, характера его использования, структурной схемы его надежности, вида (или способа определения) предельного состояния. Таким образом, примером типа объекта может служить транспортное средство. Рассмотрим два типа транспортных средств - пассажирский самолет и сельскохозяйственный трактор. Отказ важного элемента самолета в полете приведет к катастрофе, а у трактора к остановке в поле. Последствия отказа сильно отличаются, поэтому и виды предельного состояния тоже будут различны. Для самолета предельное состояние - значение вероятности отказа в полете, обусловленное требованиями безопасности. У трактора - значение вероятности отказа, обусловленное требованиями экономической целесообразности его использования. Структурная схема определяется наличием резервирования элементов. У самолета большинство систем резервировано, у трактора - только тормозная система.

Динамика текущих значений параметров ТС элементов в процессе эксплуатации отслеживается посредством проведения периодического диагностирования согласно плану проведения мероприятий ТОР или посредством непрерывного диагностирования специальными приборами, встроенными в эксплуатируемый объект, и наблюдениями персонала. Динамика текущих значений показателей уровня надежности оценивается на основании сбора статистической информации по отказам элементов.

Планирование мероприятий по обслуживанию, ремонту и замене элементов производится с учетом специфики эксплуатации объектов. Например, для машин транспортного строительства (газопроводы), используемых сезонно в труднодоступных для проведения мероприятий по обслуживанию и ремонту местах, период между ремонтами будет длительным. Поэтому запас ресурса элементов машин до ремонта или

замены должен назначаться соответственно увеличенным. Поэтому возрастает и объем работ по ремонту и замене перед сезоном работы. Такой метод ТОР по состоянию можно назвать превентивным.

Предмет, задачи и методы

Предметом исследования являются СМ, как сложные технические системы, состоящие из элементов, периодичность замены которых определяет надежность машины в целом.

Задача, решаемая в статье – разработка методов обоснования периодичности замен узлов. Используются методы статистического анализа и прогнозирования.

Оценка надежности узлов машин с помощью теории массового обслуживания

Многие исследователи (Bujaczek, 2013; Repin, 2015; Protasov, 2011; Chernyavsky, 2010) предлагают оценивать надежность машин с помощью теории массового обслуживания (ТМО). Схема изменения состояний элементов, заменяемых по наработке, составленная согласно методам ТМО, представлена на рисунке 1.

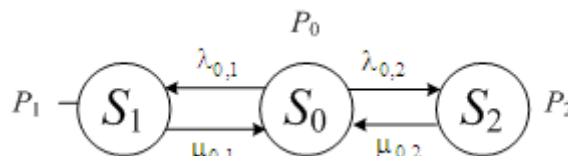


Рисунок 1. Размеченный граф состояний элемента, заменяемого по наработке:

S – состояния элемента (S_0 – работоспособен, S_1 – плановая замена, S_2 – неплановая замена); λ – интенсивности отказов; μ – интенсивности восстановлений; P – вероятности состояний

Интенсивности переходов между состояниями определяются по формулам:

$$\lambda_{0i} = (T_{omi})^{-1}, \mu_{0i} = (T_{ei})^{-1} \quad (1)$$

где T_{omi} – наработка на i -й отказ ($i=1$ – плановая замена, $i=2$ – неплановая замена); T_{ei} – время восстановления работоспособности после i -го отказа.

Суммарная интенсивность отказов:

$$\lambda = \lambda_{0,1} + \lambda_{0,2} \quad (2)$$

Уравнения Колмогорова для описываемого случая имеют вид:

$$\begin{cases} P_0 \lambda_{0,1} = P_1 \mu_{1,0} \\ P_0 \lambda_{0,2} = P_2 \mu_{2,0} \\ P_0 + P_1 + P_2 \end{cases}$$

Решая систему, получим:

$$P_0 = (1 + \frac{\lambda_{0,1}}{\mu_{1,0}})^{-1}; P_1 = P_0 \frac{\lambda_{0,1}}{\mu_{1,0}}; P_2 = P_0 \frac{\lambda_{0,2}}{\mu_{2,0}} \quad (3)$$

Пример

Пусть периодичность замены (межремонтный период T_p (T_p – наработка узла на плановый ремонт) рукава высокого давления (РВД) гидроцилиндра ковша составляет 5000 мото-ч. ($T_p = T_{om1} = 5000$ мото-ч.), продолжительность операции замены – 0,5 ч ($T_{e1} = 0,5$ ч). Средняя наработка на отказ $T_{om2} = T_{om} = 6500$ мото-ч. Среднее время восстановления после внезапного отказа РВД – 5 ч. ($T_{e2} = 5$ ч.). Требуется определить вероятности состояний и фактическую потребность в заменах.

По результатам расчета по формулам (1)...(3), получены вероятности состояний $P_0 = 0.999$, $P_1 = 9.991 \cdot 10^{-5}$, $P_2 = 7.686 \cdot 10^{-5}$, показывающие весьма высокую надежность РВД. Данный метод пригоден для оценки надежности машины как системы элементов, что дает возможность подсчитать такие важные показатели

машины, как коэффициенты готовности и технического использования, но не дает должного представления об эксплуатационной надежности элементов и не позволяет определить фактическую потребность в их заменах. Так, например, опыт эксплуатации показывает, что один из шести РВД не дорабатывает до установленного срока замены. Для оценки вероятности безотказной работы элемента до наступления срока его замены предпочтительнее воспользоваться методами теории вероятностей.

Определение параметров законов распределения наработки на отказ

Сроки плановых замен назначаются по известному ресурсу деталей. Естественно, период плановой наработки детали до момента времени ее замены не должен превышать средней наработки на отказ. Статистическое распределение ресурса РВД, как и большинства неремонтируемых деталей, подчиняется нормальному закону. Нормальный закон хорошо описывает распределение случайных величин при большом влиянии равнозначных факторов. Характеристики нормального закона распределения случайной величины T (например, наработки машины, узла) определяются по выражениям:

- функция распределения вероятности:

$$F(T) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{(T - \bar{T}_{om})^2}{2\sigma^2}\right) dt \quad (4)$$

- вероятность безотказной работы:

$$P(T) = 1 - F(T) \quad (5)$$

- плотность распределения:

$$f(T) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(T - \bar{T}_{om})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

- среднее квадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T}_{om})^2}{N-1}} \quad (7)$$

где \bar{T}_{om} – математическое ожидание случайной величины (средняя наработка до отказа и т.д.)

В интерпретации для рассматриваемого случая анализа надежности РВД функция распределения вероятности $F(T)$ показывает вероятность отказа элемента до наступления момента времени его плановой замены.

Значительно облегчает работу по анализу эксплуатационной информации использование математической среды Mathcad. Поэтому для статистического анализа данных по наработке, подчиняющихся нормальному закону, была разработана Mathcad-программа (Репин, 2012; Репин, 2016). На рисунке 2 представлены графики вероятности $P(T)$ безотказной работы и функции распределения вероятности $F(T, \bar{T}_{om}, \sigma)$, $f(T, T_p, \sigma)$ для РВД, полученные с помощью данной программы на основании приведенных выше статистических данных. Значения среднее квадратичное отклонения σ выбраны исходя из рекомендаций исследователей.

На рисунке 3 представлены графики плотности распределения вероятности наработки на отказ РВД – $f(T, \bar{T}_{om}, \sigma)$, $(f(T, T_p, \sigma))$. Выделенные площади графиков слева от линии T_p (обозначенные номерами 3 и 4 фигуры ABD и ACD) соответствуют вероятностям отказа РВД до наступления момента плановой замены.

Разработка модели оптимизации количества замен по удельным затратам и надежности заменяемых элементов

В основу вероятностных моделей определения наработки до предупредительной замены положена идея минимизации средневзвешенных затрат на ремонты, предложенная проф. Е.И. Зайцевым. В качестве весовых коэффициентов для двух альтернатив: аварийного ремонта, вызванного внезапным отказом, и

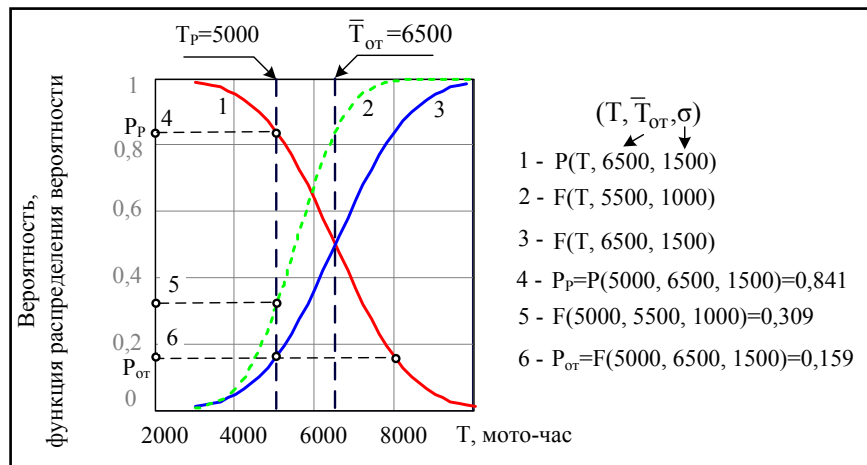


Рисунок 2. График вероятности безотказной работы (линия 1) и функции распределения вероятности наработки на отказ РВД (линии 2, 3): T_p – наработка узла на плановый ремонт; $P_{от}$, $P_{ом}$ – вероятность безотказной работы или отказа узла до момента времени проведения планового ремонта соответственно

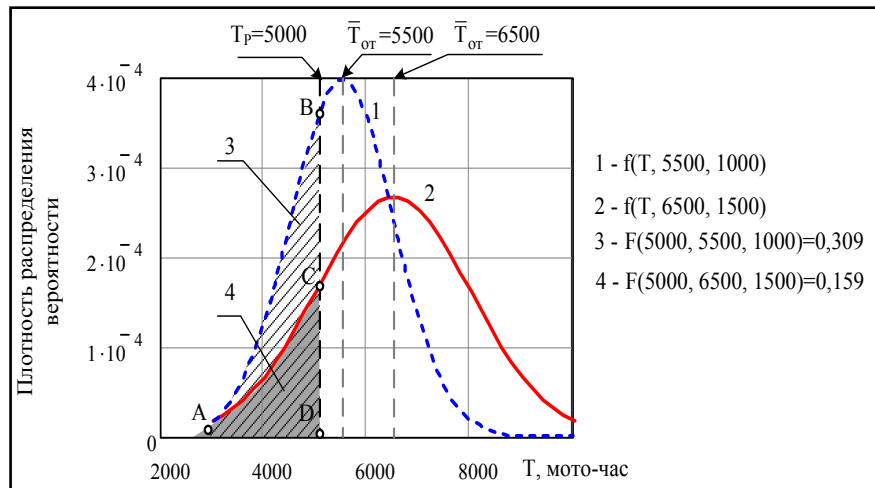


Рисунок 3. График плотности распределения вероятности наработки на отказ РВД (обозначения те же, что и на рисунке 2)

предупредительного ремонта, используется соответственно риск пропуска отказа (Репин, 2012) (соответствует $F(T_p)$).

$$R_p = \int_0^{T_p} f(T) dT = F(T_p) = 1 - P(T_p) \quad (8)$$

и риск перерасхода средств на предупреждение отказов (соответствует вероятности безотказной работы):

$$R_n = \int_{T_p}^0 f(T) dT = P(T_p) \quad (9)$$

где $f(T)$ – плотность распределения наработок до отказа с математическим ожиданием $T_{от}$, T_p – наработка, на которой выполняется предупредительный ремонт.

Подлежащие минимизации затраты определяются по формуле:

$$Z = Z_p \cdot R_p + Z_n \cdot R_n = Z_p [1 - P(T_p)] + Z_n \cdot P(T_p) \rightarrow \min \quad (10)$$

где Z_p – суммарные затраты на аварийный ремонт, Z_n – суммарные затраты на предупредительный ремонт.

Если составляющие затрат выразить через средние стоимости аварийного C_p (с учетом ущерба Y – прямого, к примеру, от потерь рабочей жидкости (РЖ) и сопряженного из-за остановки работ) и предупредительного C_n ремонтов, то получим:

$$Z = \frac{T_{xp} \{ (C_p + Y) \cdot [1 - P(T_p)] + C_n \cdot P(T_p) \}}{T_p} \rightarrow \min \quad (11)$$

где $T_{кр} / T_p$ – количество эксплуатационных (ремонтных) циклов на заданной конечной наработке $T_{кр}$ (например, до капитального ремонта).

Для рассматриваемого примера также разработана Mathcad-программа. На рис.6 представлены графически результаты расчета оптимальных периодов замены элементов по минимуму затрат за ремонтный цикл для различных значений ущерба Y .

Расчет выполнен для двух видов заменяемых элементов одноковшовых экскаваторов (ОКЭ) – рукавов высокого давления (РВД) и зубьев ковша. Среднее время наработки на отказ ($T_{от}$) РВД соизмеримо с наработкой до КР (6500 и 8000 мото-часов соответственно), поэтому количество замен в межремонтный период не превышает двух, что снижает показательность некоторых диаграмм. Однако для РВД велико влияние сопряженного с внезапным отказом ущерба ($Y(D$ - англ) – до 10000 руб.), т.к. в случае разрыва РВД вытекает большое количество дорогостоящей рабочей жидкости. Для зубьев ковша ($T_{от}$) = 400...500 мото-часов, поэтому количество замен для элементов с разными показателями надежности значительно различается. На рисунке 4 представлено влияние характеристик надежности заменяемых элементов на величину оптимальных периодов замены элементов, рассчитанных по минимуму затрат за ремонтный цикл. Использование данного метода анализа позволяет подойти к оптимизации закупок запчастей с точки зрения «цена-качество».

Влияние величины ущерба от внезапных отказов элемента оборудования на значение оптимальных периодов его замены показано на рисунке 5. Расчет выполнен для двух заменяемых элементов с различными параметрами характеристик надежности.

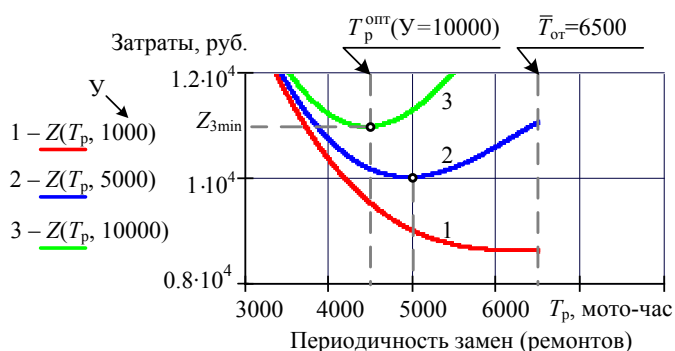


Рисунок 4. Результаты расчета оптимальных периодов замены элементов (РВД) по минимуму затрат за ремонтный цикл для различных значений ущерба Y (руб.): 1 – 1000, 2 – 5000, 3 – 10000

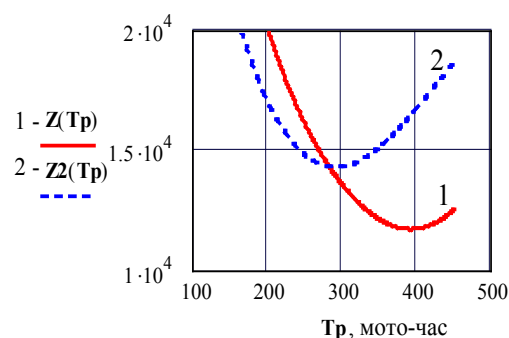


Рисунок 5. Влияние надежности заменяемых элементов (зубья ковша) на величину оптимальных периодов замены элементов, рассчитанных по минимуму затрат за ремонтный цикл (характеристики в таблице 1)

Таблица 1. Характеристики заменяемого элемента (на примере зуба экскаватора)

Элемент	$T_{от}$, мото-час	σ , мото-час	C_n , руб.	C_p , руб.	$У$, руб.
№ 1	550	100	500	800	1000
№ 2	450	120	400	700	1000

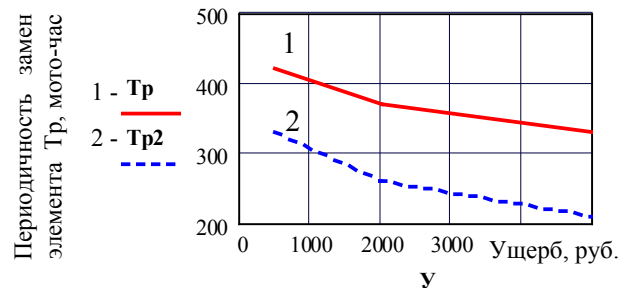


Рисунок 6. Влияние величины ущерба от внезапных отказов элемента оборудования (зуба) и его характеристик на значение оптимальных периодов замены (на примере зуба экскаватора)

Элементы, заменяемые по состоянию с контролем уровня надежности

Особенности эксплуатации и замены агрегатов:

- главными характеристиками надежности элементов заменяемых по состоянию с контролем уровня надежности являются значения ресурса нового агрегата T_H и заменяемого T_3 в результате ремонта, характеризующиеся наработкой в мото-часах;

- ресурс заменяемого (отремонтированного) элемента связан с ресурсом нового через коэффициент восстановления ресурса K_g , то есть $T_3 = T_H \cdot K_g$ (для агрегатов гидропривода $K_g = 0,3 \dots 0,8$);

- реализация ресурса по наработке подчиняется нормальному закону распределения;

- реализация ресурса по наработке подчиняется нормальному закону распределения;

- динамика наработки на отказ по времени описывается экспоненциальным законом:

$$T_{ом}(t) = T(1) \cdot \exp(-\beta_z \cdot t)$$

- распределение планируемой годовой наработки машины подчиняется равномерному закону.

Определение количества замен элементов за срок службы машины с учетом разброса значений ресурса заменяемого элемента

Пусть средний ресурс машины $T_{p,ср}$. Без учета разброса ресурса элемента общее число необходимых запасных частей n на одну машину за срок службы до списания определится соотношением:

$$n = (T_{p,ср} - T_H) / T_3 \quad (12)$$

С учетом вероятного отклонения ресурса для нормального закона его распределения число запасных элементов определяют следующим образом. Пусть заданы средний ресурс до первой замены конкретного элемента T_H , среднее квадратическое отклонение ресурса как новых, так и замененных элементов, σ и коэффициент восстановления ресурса K_g . К моменту первой замены средний ресурс составит $T_1 = T_H$ к моменту второй замены $T_2 = T_H + T_3 = T_H (1 + K_g)$, к моменту i -й замены:

$$T_i = T_H [1 + K_g(i-1)] \quad (13)$$

Предположим, что среднее квадратическое отклонение ресурса при всех заменах элементов не изменяется $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$. Однако, рассматривая график плотности распределения, можно заметить, что разброс значений ресурса по оси наработки будет возрастать с каждой заменой на величину 4. Чтобы избежать возрастания

неопределенности значения ресурса после i -той замены предложено (Репин, 2015) рассчитывать среднее квадратическое отклонение ресурса по формуле:

$$\sigma_i = \sigma \sqrt{i} \tag{14}$$

Тогда вероятность отказа элемента при каждой замене:

$$F(T) = \Phi\left\{\frac{T_{p,cp} - T_H - T_H \cdot K_g(i-1)}{\sigma \sqrt{i}}\right\} \tag{15}$$

где $\Phi\{..\}$ – функция Лапласа, определяется по таблице значений функции нормального распределения. Общее число замен элементов, необходимое для одной машины с учетом разброса ресурса:

$$z = \sum_{i=1}^8 F_i(T_i) \tag{16}$$

Пример

Срок службы гидропривода $T_{p,cp} = 4000$ ч, ресурс предохранительного клапана $T_H = 1500$ ч, среднее квадратическое отклонение ресурса $\sigma = 300$ ч, коэффициент восстановления $K_g = 0,3$. Задача – определить необходимое число предохранительных клапанов для обеспечения срока службы гидропривода. Решение, выполненное в программе Mathcad, приведено на рисунках 7 и 8.

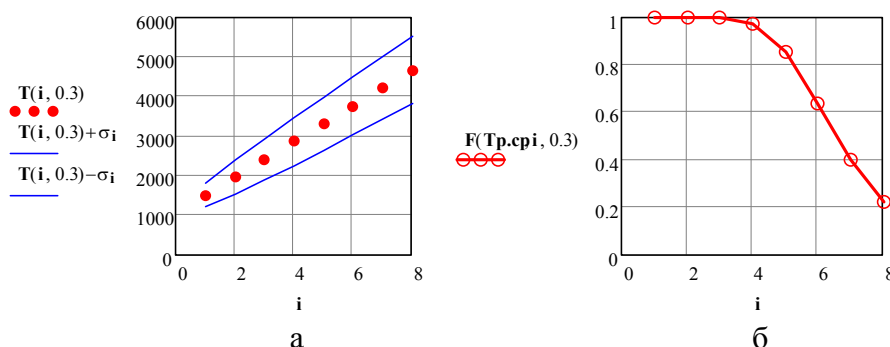


Рисунок 7. Графики зависимости от порядкового номера замены i : а – периодичности замен элемента; б – вероятности отказа элемента после i -той замены до истечения срока среднего ресурса машины $T_{p,cp}$

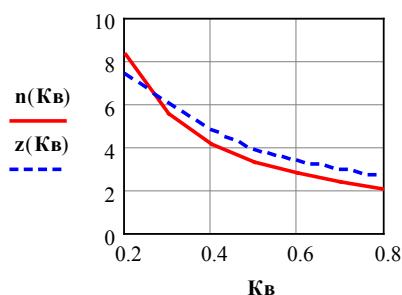


Рисунок 8. Графики зависимости количества замен элемента от коэффициента восстановления ресурса K_g : n – без учета разброса ресурса (формула 12); z – с учетом разброса ресурса (формула 16)

На основании решения, представленного на рисунке 7б, число запасных предохранительных клапанов с учетом разброса ресурса:

$$z = \sum_{i=1}^8 F_i \cong 6$$

Следует отметить, что количество замен элемента существенно зависит от коэффициента восстановления ресурса K_g . Зависимость количества замен n и z от коэффициента восстановления ресурса K_g , представлена графически на рисунке 8.

Для повышения значения вероятности безотказной работы следует сокращать пери-одичность замен элементов.

Элементы, заменяемые по состоянию с контролем параметров технического состояния

В динамике параметров технического состояния элементов машины можно выделить некоторые особенности эксплуатации и замены агрегатов (элементов) по состоянию с контролем параметров:

- в процессе эксплуатации изменяется их главный параметр X_i , характеризующий работоспособность элемента;
- предельное состояние определяется предельным значением параметра $X_{пред}$;
- для прогнозирования момента времени замены элемента следует знать закон изменения $X(T)$ и предельное значение параметра.

Прогнозирование остаточного ресурса

В теории распознавания и прогнозирования существуют два основных подхода к задаче прогнозирования: вероятностный и детерминистский (Репин, 2011; Makhutov, 2013; Shao-FeiJiang, 2014; Makhutov, 2015; Trukhanov, 2014; Makhutov, 2013; Репин, 2011).

Прогнозирование детерминированных (функциональных) процессов осуществляется путем интерполирования (отыскания промежуточного значения функции в интервале) или экстраполирования (отыскания значения функции вне интервала). В этом случае сначала выявляется аналитическое выражение исследуемой функции, а затем осуществляется прогнозирование. При прогнозировании детерминированных процессов с небольшим временем упреждения используют интерполяционный полином Лагранжа. Когда мало информации о контролируемой функции, используют метод наименьших квадратов. Эмпирические формулы применяют в виде функций: дробно-линейной, степенной, показательной, логарифмической и др.

Пример

Прогнозирование остаточного ресурса шестеренного насоса НШ-46У по материалам изменения объемного КПД 20 насосов. Данные по изменению объемного КПД от наработки приведены в таблице 2.

Таблица 2. Данные по изменению объемного КПД насоса от наработки

Насос	Наработка T , тыс. ч				
	0,0	0,4	0,8	1,2	1,4
№1	0,932	0,929	0,889	0,864	0,859
№2	0,945	0,945	0,925	0,896	0,866
№3	0,925	0,914	0,894	0,860	0,825
№4	0,959	0,966	0,946	0,921	0,895
№5	0,946	0,946	0,926	0,898	0,869
№6	0,941	0,938	0,918	0,888	0,858
№7	0,934	0,928	0,908	0,877	0,845
№8	0,972	0,968	0,958	0,934	0,910
№9	0,971	0,968	0,948	0,922	0,897
№10	0,955	0,960	0,940	0,913	0,887
№11	0,923	0,922	0,892	0,857	0,822
№12	0,964	0,962	0,952	0,928	0,903
№13	0,953	0,957	0,937	0,909	0,882
№14	0,943	0,941	0,921	0,891	0,861
№15	0,932	0,925	0,905	0,872	0,839
№16	0,939	0,925	0,855	0,814	0,773
№17	0,915	0,900	0,880	0,843	0,807
№18	0,935	0,930	0,910	0,878	0,846
№19	0,921	0,939	0,889	0,853	0,818

№20	0,923	0,921	0,891	0,856	0,821
Станд. откл. $-\sigma$	0,016	0,019	0,027	0,031	0,035
Коэф. вариации	0,017	0,020	0,030	0,035	0,041
Верхний уровень значений КПД: $U_1 = \eta + \sigma$	0,958	0,958	0,941	0,915	0,889
Среднее значение объемного КПД: η	0,941	0,939	0,914	0,884	0,854
Нижний уровень значений КПД: $U_2 = \eta - \sigma$	0,925	0,920	0,887	0,853	0,819

Распределение значений КПД насосов при одной и той же наработке подчиняется нормальному закону (рисунки 9, 10).

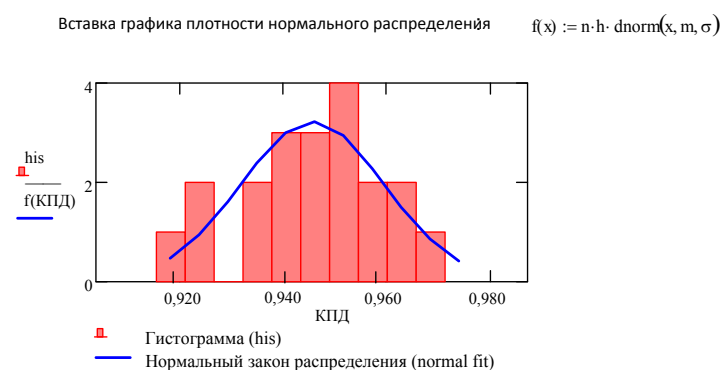


Рисунок 9. Гистограмма распределения значений КПД нового насоса ($T = 0$) и график плотности нормального закона распределения

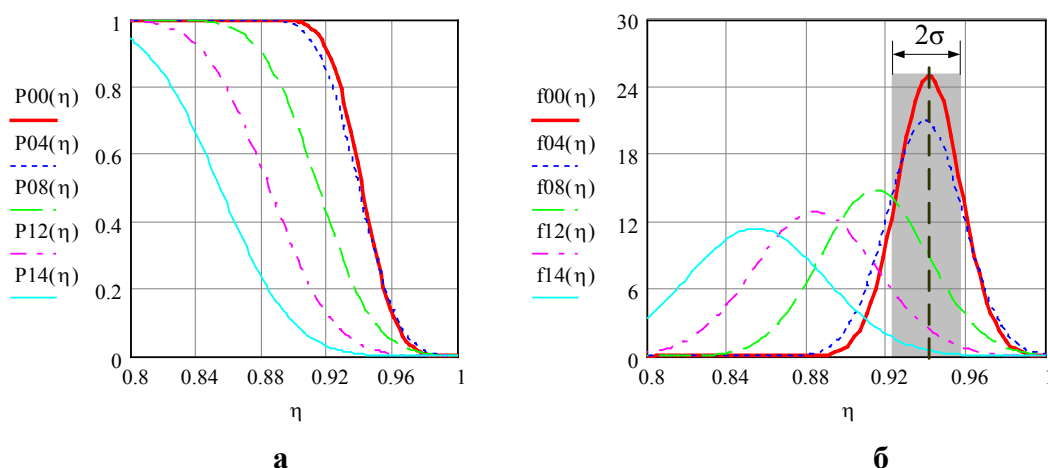


Рисунок 10. Графики зависимости от наработки:
 где а – вероятности попадания значений КПД насоса в интервал не ниже заданного кривой $P(\eta)$;
 б – плотности нормального закона распределения значений КПД (в обозначении вероятности и плотности цифры выражают наработку в сотнях часов)

Для всех 20 насосов нахождением математического ожидания посередине интервалов наработки строится усредненная кривая (характеристика) изменения объемного КПД от наработки – T (рисунок 10).

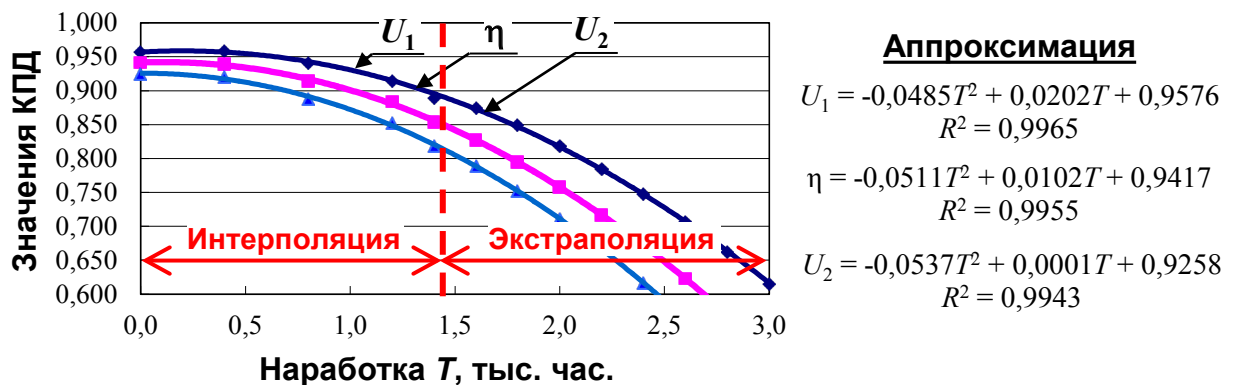


Рисунок 11. Результаты анализа и прогнозирования динамики КПД насоса в Excel

Аппроксимация полученной кривой выполнена путем нахождения параметров с использованием метода наименьших квадратов и имеет вид:

$$\eta = aT^2 + bT + c \quad (17)$$

Посредством данной кривой производится прогнозирование значений КПД – среднего значения (выражения для « η ») с интервалом рассеяния $\pm\sigma$ (выражения для U_1, U_2).

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке РГНФ в рамках научно-исследовательского проекта «Разработка методики формирования структурных элементов транспортной системы по экономическим и надежностным критериям (на примере парков транспортно-технологических машин)», проект № 15-02-00512.

Литература

Bujaczek, R., Sławiński K., Grieger A. (2013). Agricultural machines maintenance and repair services in Western Pomerania. *Technical sciences*, 16(1), pp. 13–18.

Chernyavsky, A., Shadchin, A. (2010). Evaluation of reliability of low damage probability calculations for unitary structures. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 39(4), pp. 402–406. DOI: 10.3103/S105261881004017

Makhutov, N., Fomin, A., Ivanov, V., Permyakov, V., Vasil'ev, I. (2013). Integrated diagnostics of limit states and early warning of emergency conditions of structures. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 42(2), pp 109–113. DOI: 10.3103/S105261881302009X

Makhutov, N., Reznikov, D. (2015). Application of scenario analysis in the assessment of structural reliability of complex technical systems. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 44(8), pp 675–686. DOI: 10.3103/S105261881508.

Protasov, A., Nikolaychuk, O. (2011). Applying the finite-element method for evaluating the reliability of mechanical systems. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 40(1), pp 27–30. DOI: 10.3103/S1052618811010

Repin, S.V., Evtjukov, S.A. (2015). Renewal Methods of Construction Machinery According to Technical and Economic Indicators. *Applied Mechanics and Materials*, 725–726, pp. 990–995. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.9

Shao-Fei Jiang, Da-Bao Fu, Si-Yao Wu (2014). Structural Reliability Assessment by Integrating Sensitivity Analysis and Support Vector Machine. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 6 pages. DOI: 10.1155/2014/586.

Trukhanov, V. (2014). Mathematical model of changing the reliability level of products considering the control actions expressed in the form of probabilities. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 43(2), pp. 124–126. DOI: 10.3103/S1052618814020186.

Репин, С.В., Андронов, А.В., Зазыкин, А.В. (2011). Применение информационной системы управления техническим состоянием транспортно-технологических машин для определения их оптимальных сроков службы. *Журнал автомобильных инженеров*, 1, с.36–39.

Репин, С.В., Рулис, К.В., Зазыкин, А.В., Крупин, С.А. (2012). *Методология обеспечения работоспособности транспортно-технологических машин и комплексов средствами технической эксплуатации*. СПб: СПбГАСУ, с.218.

Репин, С.В., Бондаренко, А.В. (2012). Оптимизация периодичности замен узлов транспортных и технологических машин на основе информации по динамике параметров их технического состояния. *Вестник гражданских инженеров*, 2(31), с.236–243.

Репин, С.В., Зазыкин, А.В., Евтюков, С.С. (2016). *Надежность и эффективность транспортно-технологических машин*. СПб: Петрополис, с.86.

СНИЖЕНИЕ КАСАТЕЛЬНЫХ СИЛ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЕМ ГЕОМЕТРИИ СВАИ

Ольга Третьякова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29

sasychev@ya.ru¹, gennady.badin@mail.ru²

Аннотация

Предметом исследования являются фундаменты мелкого заложения в сезонно промерзающих грунтах. Одной из основных причин достижения конструкциями фундаментов предельных состояний по прочности и устойчивости положения, является такое опасное природное явление, как морозное пучение грунтов. Целью данной работы является снижение негативного влияния сил морозного пучения на фундаменты мелкого заложения. Предложена методика защиты заглубленных конструкций от влияния промерзающего грунта. Разработана буронабивная свая с верхним обратным конусом, позволяющая частично нейтрализовать касательные силы морозного пучения за счет вертикальной составляющей сил пучения, действующих по нормали к боковой поверхности сваи. Использование метода приведет к повышению долговечности сооружений, к уменьшению стоимости их возведения и эксплуатации.

Ключевые слова

Заглубленные конструкции, морозное пучение, напряженно-деформированное состояние, нормальные и касательные силы, выдергивающая нагрузка, буронабивная свая, обратный конус.

Введение

В холодных районах при сезонном понижении температуры воздуха происходит охлаждение и промерзание грунта, связанное с образованием линз льда. Это приводит к увеличению объема грунтового массива и подъему его поверхности. При ограничении расширения промерзающего грунта фундаментами зданий и сооружений развиваются значительные силы морозного пучения. Опасный природный процесс морозного пучения грунтов оказывает негативное воздействие на фундаменты зданий и заглубленные сооружения, вызывая разрушение конструкций. Это отмечают в своих работах Н. Н. Морарескул (1950), Б. И. Далматов (1954), В. Д. Карлов (1998), О.Р. Голли (2000), J. Modisette (2014), T. Kibriya (2015), M. Babaei (2016) и многие другие авторы.

Существующие методы защиты тоннелей мелкого заложения от влияния морозного пучения предусматривают два основных подхода.

Первый заключается в соответствующем расчете конструкций, способных *без разрушения воспринимать силы морозного пучения*.

Второй подход предполагает снижение влияния сил пучения на конструкции. С этой целью применяются различные инженерно-мелиоративные мероприятия, химические, тепловые и конструктивные методы. Однако большинство из них составляет дополнительную статью расходов на проектирование, монтаж и эксплуатацию. Более рациональным является поиск решений в конструкции самого сооружения, без дополнительных элементов и мероприятий. Представляют интерес методы защиты, основанные на использовании эффективных конструкций.

Таковыми конструкциями могут быть свайные фундаменты, воспринимающие все постоянные и временные нагрузки, в том числе силы морозного пучения. Свайные фундаменты способны в той или иной степени нейтрализовать силы пучения, вызывающие неравномерный подъем сооружений. Кроме того, применение свай позволяет механизировать процесс устройства подземных частей зданий, сократить объемы земляных работ, максимально уменьшить размеры траншей и котлованов.

Напряженно-деформированное состояние сваи в сезонно промерзающем грунте определяется преимущественно касательными силами морозного пучения, оказывающими на сваю выдергивающее действие. В общем случае касательные силы пучения нейтрализуются за счет трения по боковой поверхности сваи, расположенной в талом грунте. Это неэффективно, так как требует значительной длины свай.

Уменьшение длины возможно при снижении сил пучения за счет оптимизации конструктивного решения свай, в частности их формы.

Расчет свай на выдергивающие усилия проводился многими авторами, в числе которых Б. И. Далматов, Ф. К. Лапшин, Ю.В. Россихин, А. С. Кананян (1975). Авторы отмечали, что напряженно-деформированное состояние сваи и грунта вокруг нее при выдергивающих нагрузках существенно зависит от конструкции и формы сваи. Впоследствии оптимизацией формы свай, работающих в глинистых пучинистых грунтах, занималась О.П. Медведева (1992). Автор рассматривала пирамидально-призматические забивные сваи с нижним конусом, уменьшающимся к основанию сваи. По итогам работы обозначена повышенная несущая способность пирамидально-призматической сваи на действие касательных сил морозного пучения, без учета нормальных сил. Параллельно в НИИОСП имени Н.М. Герсеванова проводились исследования фундаментов пирамидальной, трапецевидной, ромбовидной формы и в виде усеченного конуса, ориентированного большей стороной вниз. По результатам наблюдений при уклоне боковой поверхности фундамента 1,5 градусов зафиксировано значительное снижение касательных сил морозного пучения (1980). Позднее под руководством Б.С. Юшкова были проведены исследования работы полых двуконусных свай в пучинистых грунтах (1987). В пределах этих исследований Д.С. Репецкий проанализировал напряженно-деформированное состояние одиночной двуконусной сваи в условиях морозного пучения грунта (2011). А.О. Добрынин установил снижение влияния сил морозного пучения на куст из свай двуконусной формы (2012). Б.С.Юшков высказал предположение, что на верхней конусной части сваи возникают силы, удерживающую сваю от подъема. Автор рекомендовал метод расчета двуконусной сваи с учетом удерживающей силы. Сложность метода заключается в необходимости наличия данных по величине подъема поверхности грунта при морозном пучении. Из зарубежных исследователей George R. Newton представил комбинированную свайную конструкцию, пригодную для районов с вечной мерзлотой и слоем водонасыщенного сезонно промерзающего грунта (1972). Автор сделал вывод, что при данном конструктивном решении в процессе замерзания грунтовой влаги возникает сила, препятствующая подъему сваи. Однако величина удерживающих силовых факторов и методика конструирования сваи не приводятся. Основываясь на сказанном, можно заключить, что исследования в области оптимизации формы сваи перспективны, но недостаточны для практического применения и требуют дальнейшего развития. Для использования предложенных конструктивных решений в практическом проектировании необходимы методики расчета геометрических характеристик свай с учетом фактических гидрогеологических условий строительной площадки. Требуются также технологические разработки по устройству свай.

Материалы и методы

Впредлагаемойработерассматриваетсяприменениесвайоптимизированнойконструкцииприпрактическом проектировании сооружений на сезонно промерзающих грунтах. Предложена конструкция сваи, устойчивая к действию сил морозного пучения и метод ее расчета. Конструкция предложенной буронабивной сваи выполнена с **верхним обратным конусом**, имеющим расчетные геометрические параметры. Конструктивное решение и расчетная схема сваи показаны на рисунке 1.

Критерием оценки устойчивости сваи к действию сил морозного пучения является величина подъема сваи - вертикального перемещения. Подъем свайного фундамента при морозном пучении грунта происходит преимущественно за счет касательных сил, формирование которых определяется силами смерзания грунта с боковой поверхностью фундамента. Развивающиеся вокруг сваи силы пучения стремятся переместить сваю вверх. При этом происходит сдвиг мерзлого грунта относительно фундамента. Статические связи смерзания грунта с фундаментом нарушаются. Возникают динамические связи сваи с грунтом, определяемые сопротивлением смещению слоя мерзлого грунта относительно сваи – касательными силами пучения.

Главная идея исследования заключается в нейтрализации касательных сил морозного пучения конструктивным решением сваи. Для реализации этой идеи поставлена задача определения силового фактора, компенсирующего выдергивающие касательные силы за счет статического потенциала сваи. Достигнуто это приданием верхней части сваи формы обратного конуса. Силовым фактором является вертикальная составляющая сил пучения, действующих по нормали к боковой поверхности конуса сваи. Даная составляющая возникает за счет наклона поверхности конуса, направлена от дневной поверхности и частично нейтрализует касательные силы, выдергивающие сваю.

Научная новизна исследования состоит:

в прогнозируемом, учтенном расчетом преобразовании сил морозного пучения, действующих по нормали к боковой поверхности сваи, в позитивные силы, удерживающие сваю в грунте при ее выдергивании касательными силами пучения; величина полученной удерживающей силы определяется углом наклона конуса;

в получении выражений для геометрических параметров сваи, оптимальных для нейтрализации касательных сил пучения.

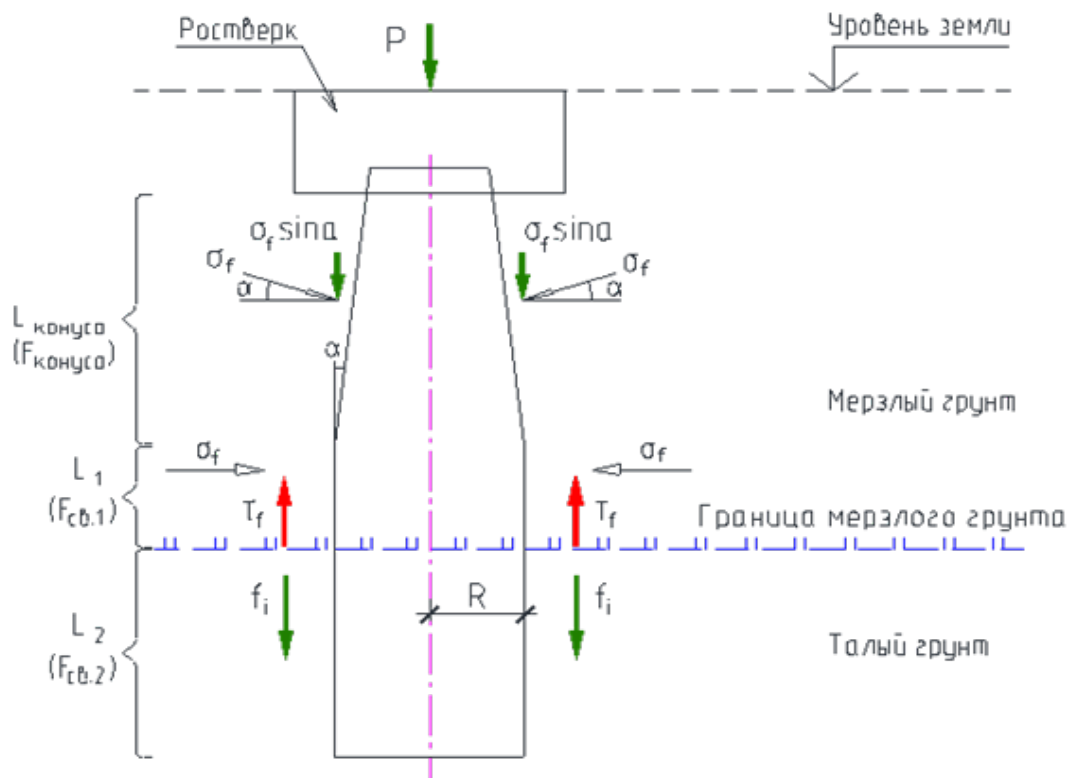


Рисунок 1. Конструкция и расчетная схема сваи с верхним обратным конусом. **Выдергивающие силы:** T_f – касательные силы морозного пучения, действующие на участке сваи, расположенном в мерзлом грунте; **Силы, удерживающие сваю в грунте:** P – сумма внешней постоянной нагрузки и собственного веса сваи; f_i – силы трения по боковой поверхности сваи в талой зоне; $\sigma_f \sin \alpha$ – составляющая нормальных сил пучения в пределах обратного конуса, расположенного в мерзлом грунте; $F_{конуса}$, $F_{сб.1}$, $F_{сб.2}$ – площади поверхностей указанных на схеме участков сваи; L – длина верхнего обратного конуса сваи

Негативное влияние вертикальных нормальных сил пучения на ростверк предотвращается устройством под ростверком дренирующей противоположинистой подсыпки с уклоном от сваи. Для защиты от заиливания возможно устройство георешетки. В качестве примера приведен узел установки сваи с обратным конусом в основании тоннеля мелкого заложения (рисунок 2). Подсыпка предусматривается из щебня крупной фракции без уплотнения. Это обеспечивает отвод влаги, приводящей к пучению, от ростверка. Неуплотненная подсыпка, обладая некоторой податливостью, компенсирует влияние на ростверк пучащегося грунта, расположенного ниже подсыпки.

Кроме того, буронабивная свая более технологична, чем сборная, при устройстве сооружений, отдаленных от промышленных участков производства железобетонных элементов.

Для оценки показателей разработанной сваи проведены теоретические и экспериментальные исследования.

Экспериментальными исследованиями в свае с **верхним обратным конусом** в пределах конической части подтверждено возникновение вертикальной составляющей сил морозного пучения, действующих по нормали к боковой поверхности сваи. Эксперимент, проведенный в условиях морозного пучения грунта, показал, что подъем сваи с конусом меньше, чем подъем сваи без конуса. Кроме того, в конусном элементе при действии касательных сил морозного пучения развивается реактивный отпор грунта, также предотвращающий подъем сваи.

По результатам эксперимента также отмечено, что кроме перечисленных основных факторов в формировании напряженно-деформированного состояния сваи с верхним обратным конусом принимают участие еще ряд явлений. Так, при выдергивании сваи с обратным конусом некоторый объем грунта над ней в виде усеченного конуса выпирания перемещается вверх вместе со сваей. Этот фактор также оказывает на сваю удерживающее влияние. Неучтенные в расчете нагрузки от конуса выпирания; силы сопротивления грунта отрыву, действующей по его боковой поверхности, создают некоторый запас прочности для сваи с обратным конусом.

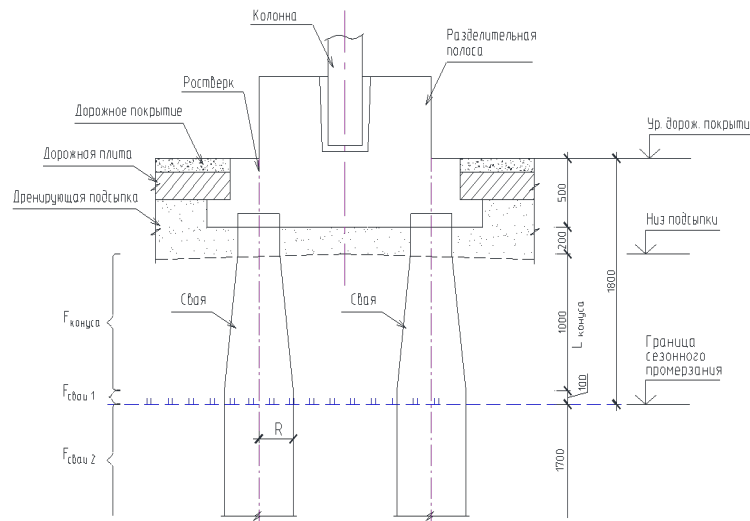


Рисунок 2. Узел установки сваи с верхним обратным конусом в основании тоннеля мелкого заложения

По результатам аналитического расчета получена формула для вычисления угла наклона конуса сваи, оптимального для восприятия сил морозного пучения. Угол наклона конуса подбирается таким образом, чтобы вертикальная удерживающая составляющая нормальных сил пучения соответствовала той части выдергивающих касательных сил, которые не компенсируются внешней нагрузкой на сваю и ее собственным весом. Величина удерживающей составляющей вычисляется из условия равновесия сваи в грунте при ее выдергивании касательными силами морозного пучения.

Уравнение равновесия сваи в грунте:

$$\tau_f \cdot F_{\text{конуса}} + \tau_f \cdot F_{\text{св1}} - f_i \cdot F_{\text{св2}} - P - \sigma_f \cdot \sin \alpha \cdot F_{\text{конуса}} = 0 \quad (1)$$

где σ_f – нормальное напряжение морозного пучения грунта на боковой поверхности сваи;

τ_f – касательное напряжение морозного пучения грунта, оказывающее на сваю выдергивающее действие;

f_i – расчетное сопротивление i -го слоя грунта на боковой поверхности ствола сваи в талом грунте, оказывающее на сваю удерживающее действие;

P – сумма внешней нагрузки и собственного веса сваи;

$F_{\text{св1}}$ – площадь боковой поверхности сваи в мерзлом грунте без учета конуса;

$F_{\text{св2}}$ – площадь боковой поверхности сваи в талом грунте;

$F_{\text{конуса}}$ – площадь боковой поверхности конусной части сваи;

α – угол наклона боковой поверхности конусной части сваи.

Преобразуем выражение (1):

$$\tau_f \cdot F_{\text{конуса}} - (-\tau_f \cdot F_{\text{св1}} + f_i \cdot F_{\text{св2}} + P) - \sigma_f \cdot \sin \alpha \cdot F_{\text{конуса}} = 0 \quad (2)$$

Обозначим выражение в скобках через «d»:

$$d = -\tau_f \cdot F_{\text{св1}} + f_i \cdot F_{\text{св2}} + P \quad (3)$$

После подстановки (3) выражение (2) примет вид:

$$\tau_f \cdot F_{\text{конуса}} - \sigma_f \cdot \sin \alpha \cdot F_{\text{конуса}} - d = 0 \quad (4)$$

Площадь конуса (рисунок 3) предварительно определим, исходя из двух допущений:

$$1) \quad F_{\text{конуса}} = 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{ср}} \cdot L$$

$$2) \quad \operatorname{tg} \alpha \approx \sin \alpha$$

Радиус конуса в среднем сечении по рисунку 3 составит:

$$r_{\text{ср}} = \frac{R+r}{2} = \frac{R+(R-x)}{2} = \frac{2 \cdot R-x}{2} = R-0,5 \cdot x = R-0,5 \cdot L \cdot \sin \alpha$$

В данном случае:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{x}{L} \Rightarrow x = L \cdot \operatorname{tg} \alpha = L \cdot \sin \alpha$$

Тогда площадь конуса:

$$F_{\text{конуса}} = 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{ср}} \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot (R - 0,5 \cdot L \cdot \sin \alpha) = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot R - \pi \cdot L^2 \cdot \sin \alpha \quad (5)$$

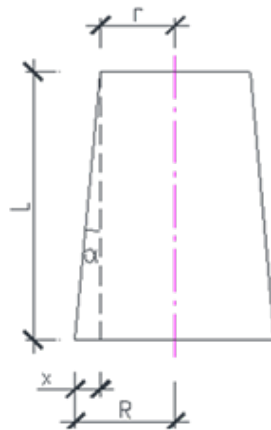


Рисунок 3. Схема к определению площади конуса

Выражение (4) после подстановки $F_{\text{конуса}}$ (5) и дальнейшего преобразования примет вид квадратного уравнения (6):

$$\sigma_f \cdot \pi \cdot L^2 \cdot \sin^2 \alpha + (-\sigma_f \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot R - \tau_f \cdot \pi \cdot L^2) \cdot \sin \alpha + (\tau_f \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot R - d) = 0 \quad (6)$$

где L – длина верхнего обратного конуса сваи; R – больший радиус верхнего обратного конуса.

Параметры квадратного уравнения:

$$a = \sigma_f \cdot \pi \cdot L^2$$

$$b = -\sigma_f \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot R - \tau_f \cdot \pi \cdot L^2$$

$$c = \tau_f \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot R - d = 0$$

$$D = b^2 - 4 \cdot a \cdot c$$

Дискриминант квадратного уравнения после преобразования примет вид:

$$D = \tau_f^2 \cdot \pi^2 \cdot L^4 + 4 \cdot \sigma_f \cdot \pi \cdot L^2 \cdot (\sigma_f \cdot \pi \cdot R^2 - \tau_f \cdot \pi \cdot L \cdot R + d)$$

Корнями уравнения будет $\sin \alpha$ – синус угла наклона верхнего обратного конуса сваи, необходимый для выполнения условия равновесия сваи в грунте:

$$x_{1,2} = \sin \alpha = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2 \cdot a} \quad (7)$$

$$x_2 = \sin \alpha = \frac{(2 \cdot \sigma_f \cdot \pi \cdot L \cdot R + \tau_f \cdot \pi \cdot L^2) - \sqrt{\tau_f^2 \cdot \pi^2 \cdot L^4 + 4 \cdot \sigma_f \cdot \pi \cdot L^2 \cdot (\sigma_f \cdot \pi \cdot R^2 - \tau_f \cdot \pi \cdot L \cdot R + d)}}{2 \cdot \sigma_f \cdot \pi \cdot L^2} \quad (8)$$

Технологически буронабивная свая с верхним обратным конусом устраивается при помощи обсадной трубы, имеющей верхнюю часть конической формы с меньшим основанием на дневной поверхности. Обсадная труба погружается в скважину, устанавливается в проектное положение арматурный каркас, опускается бетонолитная труба, производится бетонирование за один проход с применением вибраторов. После выемки бетонолитной трубы обсадная труба остается в скважине на период набора бетоном сваи распалубочной прочности. Затем обсадная труба извлекается. Производится обратная засыпка верхнего конуса с послойным уплотнением. В силу конструктивных особенностей сваи обратная засыпка производится местным грунтом и не требует доставки сухого непучинистого грунта.

Узким местом данного метода являются возможные затруднения с извлечением обсадной трубы по причине сцепления твердеющей бетонной смеси с ее внутренними поверхностями. Эти проблемы решаются нанесением на внутренние поверхности обсадной трубы разделительных составов и смазок, предотвращающих адгезию бетонной смеси с материалом трубы. До начала работ необходимо провести соответствующую подготовку внутренней поверхности обсадных труб. Для предотвращения адгезии бетонной смеси к обсадной трубе используются различные смазки: смазка технологическая «*Krystal M22*» (компания Mas Prom); смазочные средства от немецкой компании «*Elaskon Sachsen GmbH & Co.KG*», композитный материал АХС-0028МР (германская фирма РЕМСО) и другие.

Последовательность технологических операций по устройству сваи с верхним обратным конусом показана на рисунке 4.

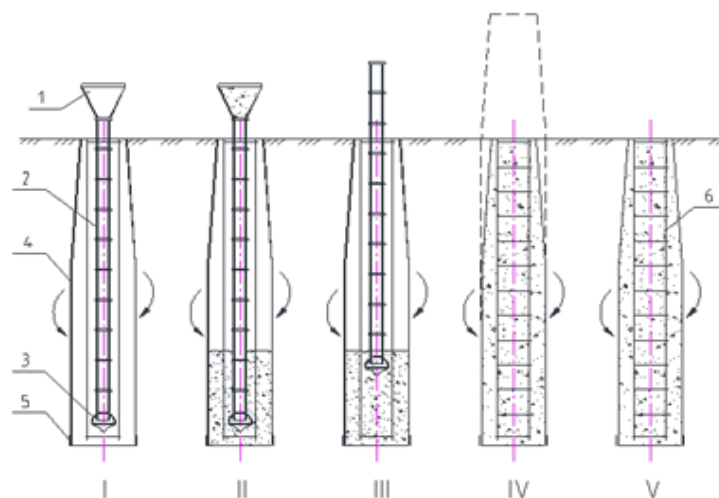


Рисунок 4. Последовательность операций при бетонировании сваи:

I – выполнение скважины и установка бетонолитной трубы; II – бетонирование сваи; III – извлечение бетонолитной трубы; IV – извлечение обсадной трубы; V – готовая свая.

1 – приемный бункер для бетонной смеси; 2 – бетонолитная труба; 3 – прибор для контроля качества укладки бетонной смеси; 4 – обсадная труба; 5 – режущий наконечник обсадной трубы; 6 – арматурный каркас

Другим вариантом технологии является исполнение сваи при помощи неизвлекаемой обсадной трубы с верхней частью конусной формы. Материал трубы – пластик низкой стоимости. Эффективными особенностями являются возможность совмещать технологические операции по защите стенок скважины и устройству опалубки конуса, а также исключение операции извлечения обсадной трубы.

Результаты

Таким образом, угол наклона обратного конуса сваи, оптимальный для нейтрализации сил пучения, определяется из условия равновесия сваи в грунте. Подводя итог исследования, покажем результаты расчета углов наклона верхнего обратного конуса свай, установленных в основании одного и того же сооружения в разных грунтовых условиях. Исходные грунтовые условия для расчета напряжений пучения заданы в таблице 1. Углы наклона конуса сваи « α » при заданной постоянной нагрузке « P » вычислены по формуле (8) с учетом характеристик грунтов и напряжений морозного пучения. Результаты расчета отражены в таблице 2.

Таблица 1. Характеристика грунтов.

Вид грунта	Удельный вес, γ , кН/м ³	Природная влажность, w , д. ед.	Число пластичности, I_p , д. ед.	Показатель текучести, LL , д. ед.	Коэффициент пористости, e , д. ед.	Степень влажности, S_r , д. ед.	Удельное сцепление, c , кПа	Модуль деформации, E , мПа
Суглинок								
Грунт №1	18,0	0,29	0,11	0,66	0,83	1,0	24	7,1
Грунт №2	19,8	0,32	0,15	0,52	0,8	0,95	19	9,7

Таблица 2. Величины углов наклона конуса сваи для двух видов грунтов

Вид грунта	D , м	L , м	L_1 , м	L_2 , м	P , кН	τ_r , кПа	σ_f , кПа	f_i , кПа	SP , см ² /час·град.С	α , град.
Грунт №1	0,6	1,0	0,1	1,7	164,3	166,64	132	14,8	0,019	8,0
Грунт №2	0,6	1,0	0,1	1,7	164,3	179,85	154	20,4	0,021	8,6

σ_f – нормальное напряжение морозного пучения грунта на боковой поверхности сваи (Tretiakova, 2016)

τ_f – касательное напряжение морозного пучения грунта, выдергивающее сваю; величина касательных сил морозного пучения на боковой поверхности сваи определена автором в зависимости от влажности и удельного сцепления частиц мерзлого грунта (2016)

f_i – расчетное сопротивление i -го слоя грунта на боковой поверхности сваи в талой зоне

SP – сегрегационный потенциал грунта, см²/час · град. С

P – сумма внешней нагрузки и собственного веса сваи

L_1 – длина участка сваи в мерзлом грунте без учета конуса

L_2 – длина участка сваи в талом грунте

L – длина конусной части сваи

D – диаметр сваи

α – угол наклона боковой поверхности конусной части сваи

Соответственно подобранные геометрические параметры верхнего конуса сваи создают условия для формирования комплекса удерживающих сил, превышающего сумму выдергивающих нагрузок, позволяя обеспечить целостность надфундаментных конструкций в любых грунтовых условиях.

Предложенный вариант технологии устройства сваи с верхним обратным конусом позволяет совмещать операции по защите стенок скважины и устройству опалубки для обратного конуса, что определяет его эффективность.

Заключение

Методом защиты зданий и сооружений в холодных районах от влияния промерзающего грунта является применение эффективных свай разработанной конструкции с повышенным сопротивлением выдергиванию силами морозного пучения. Данное конструктивное решение подкрепляется результатами теоретических расчетов и натурных экспериментов.

Оригинальность и новизна решения заключаются в использовании для борьбы с морозным пучением сил этой же природы. Наличие обратного конуса в конструкции сваи приводит к возникновению составляющих сил пучения, удерживающих сваю от подъема. Отраженное в статье конструктивное решение содержит метод практического расчета геометрических характеристик сваи, оптимальных для нейтрализации сил пучения в

конкретных грунтовых условиях. Данный метод является теоретическим вкладом в решение вопроса снижения влияния сил морозного пучения на конструкции в холодных районах.

Практическая значимость исследования состоит в исключении дополнительных затрат на защиту от морозного пучения на стадиях проектирования, возведения и эксплуатации за счет использования для этой цели свайных фундаментов сооружения.

Очевидна долговечность данного проектного решения по сравнению с другими методами.

Вывод

Не смотря на то, что теоретическая и экспериментальная работа по определению параметров исследуемой сваи проделана, для широкого практического применения таких свай в строительстве необходимо решить еще ряд вопросов.

- Степень достоверности полученных формул будет выше с увеличением количества экспериментов, проведенных в отличающихся грунтовых условиях. Поэтому целесообразно продолжить эксперименты в различных климатических районах, которым присуще явление морозного пучения грунта.

- С целью повышения применимости формул в практическом проектировании требуется разработка расчетных программ. Расчетные комплексы позволят инженеру избежать трудоемких вычислений, повышая творческую компоненту проектирования, связанную с принятием нестандартных альтернативных решений, а также с развитием данной методики.

Литература

Amoco Production Company, (1972). *Heave-proof Arctic piling*. US3703812.

Babaei, M., Liu, J., Staseff, D. (2016). Numerical analysis of freezing and thawing influence on soil nail walls. In: *Proceedings of the CGS GeoVancouver Conference*. Vancouver. Доступно по ссылке: <https://www.researchgate.net/publication/309668911> (дата обращения: 12.01.2017)

Kibriya, T., Tahir, L. (2015). Adfreeze forces on Lightly Loaded Pile foundations of Solar PV Farms in Gold Regions. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 3 (4), pp. 109–117. DOI: 10.12691/ajcea-3

Modisette, J.P., Modisette, J.L. (2014). *Pipe Line Frost Heave*. Pipeline Simulation Interest Group, 1421, pp. 1–8. Доступно по ссылке: https://www.atmosi.com/media/1419/1421-pipeline-frost-heave-or-the-lack-thereof-atmos_psig.pdf (дата обращения: 12.01.2017)

Голли, О.О. (2000). *Интегральные закономерности морозного пучения грунтов и их использование при решении инженерных задач в строительстве*. Санкт-Петербург: ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева, с.45.

Далматов, Б.И., (1954). *Исследования касательных сил пучения и влияние их на фундаменты сооружений*. Российская Академия Наук: Институт мерзлотоведения, с.60.

Далматов Б.И., Лапшин Ф.К., Россихин Ю.В. (1975). *Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов*. Ленинград: Стройиздат.

Добрынин, А.О. (2012). *Фундаменты из двухконусных свай для транспортного строительства*. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет.

Карлов, В.Д. (1998). *Сезоннопромерзающие грунты как основания сооружений*. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Санкт-Петербург: СПбГАСУ, с.349.

НИИОСП (1980). *Рекомендации по снижению касательных сил морозного выпучивания фундаментов с применением пластических смазок и кремниорганических эмалей*. Москва.

Медведева, О.П. (1992). *Работа пирамидально-призматических свай в пылевато-глинистых грунтах*. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Красноярск: Красноярский ПромстройНИИпроект.

Морарескул, Н.Н. (1950). *Исследование нормальных сил пучения грунтов*. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Ленинград: Лиси.

Репецкий, Д.С. (2011). *Работа двухконусных свай в пучинистых грунтах*. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет.

Третьякова, О.В. (2016). Величины нормальных напряжений морозного пучения, развивающихся в глинистых грунтах. *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*, 1: 125–141. DOI: 10.15593/24111678/2016.01.09

Юшков, Б.С., Пономарев, А.Б. (1987). Применение пустотелых конических свай в гражданском строительстве. В: *Сборнике научных трудов "Основания и фундаменты в геологических условиях Урала"*. Пермь.