

Ю.А. Дектерева, Д.В. Зимин, В.Я. Модорский

Пермский государственный технический университет

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ КОМПЬЮТЕРОВ ДЛЯ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ФЕРМЕННОЙ ОПРАВКИ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОЙ НАМОТКИ ТРУБ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В данной работе представлены результаты численных экспериментов по исследованию новой конструкции оправки для высокоскоростной непрерывной намотки труб из композиционного материала. Технологическая особенность намотки стеклопластиковых труб заключается в том, что при намотке на упругую оправку изменяется характер распределения относительно напряжения арматуры, особенно в первых и последних слоях. Подогрев связующего при намотке способствует эффективной фильтрации его по толщине материала уже в процессе самой намотки, а потому уменьшает первоначальное усилие натяжения наполнителя. При намотке холодным связующим рост давления на оправку продолжается вплоть до последних витков.

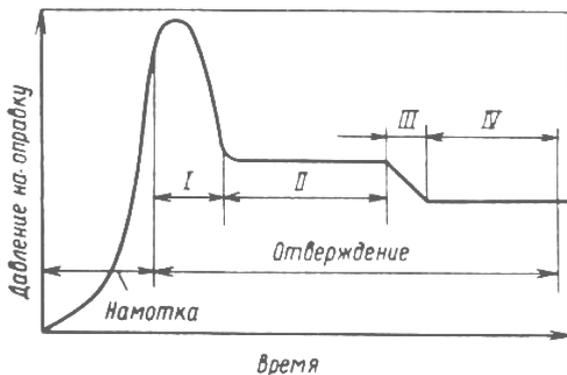


Рис. 1. Характер изменения давления на оправку в процессе намотки и отверждения: I – подъем температуры в печи; II – выдержка в печи; III – охлаждение в печи; IV – выдержка при 293 К

В соответствии с рис. 1 давление на оправку изменяется не только в процессе намотки, но и в процессе отверждения. Особенно интенсивному давлению подвержена оправка в начальный период отверждения, когда действующие давления (до 6,9–7,2 МПа) в 2–4 раза превосходят нагрузки от натяжения нити при намотке. К моменту окончания термообработки давление стеклопластика на оправку падает до 30–60 % от начального и при небольшом исходном натяжении может стать равным нулю.

Таким образом, в исследованиях интересует воздействие внешней нагрузки на оправку, эмитирующей воздействие отверждающейся трубы, вес конструкции оправки и его влияние на форму оправки (рис. 2). Оправка выполняется из стали, следовательно, материал будет иметь большую плотность и вес. Исходя из этого необходимо подобрать такую длину оправки, чтобы не происходил прогиб конструкции.

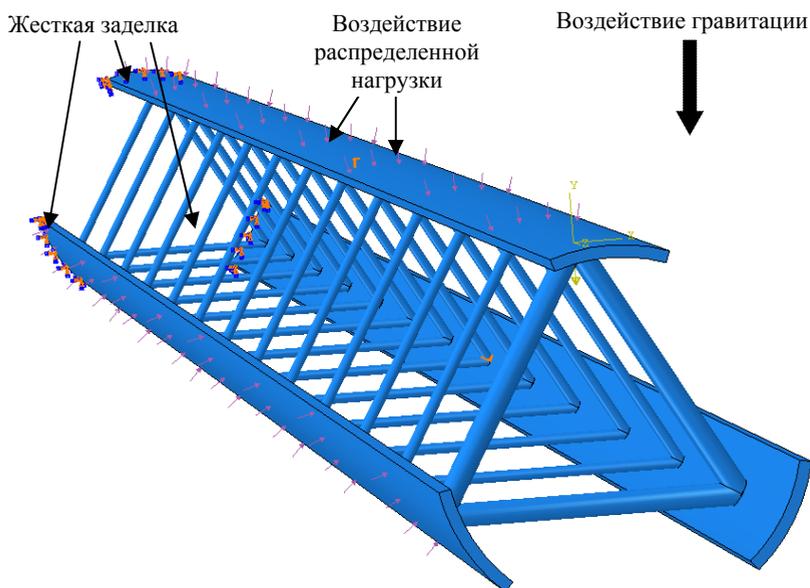


Рис. 2. Твёрдотельная модель одной секции оправки с нанесенными граничными условиями

На первом этапе исследований проводились расчеты одной секции оправки под собственным весом и подбирались геометрическая конфигурация с минимальными напряжениями и максимальной длиной. На втором этапе производился расчет оправок с первого этапа под действием силы тяжести и внешней нагрузки. На третьем этапе производился расчет оправки, состоящей из трех секций.

Все расчеты проводились на SMP-системах. Для большинства расчетов одной секции достаточно было использования SMP-системы с процессором Intel Core Two Dou E7500 с оперативной память в размере 8 Гб и кластер ПГТУ; для расчета сборки использовался только кластер ПГТУ (два процессора Barcelona III, 8 Гб оперативной памяти на одном вычислительном узле).

В табл. 1 приведен результат исследования поведения конструкции оправки под действием собственного веса – первый этап вычислений.

Таблица 1

**Расчет вариантов конструкции оправки  
под действием собственного веса**

Название	Угол поворота	$L$	$D$	$h$	$r$	$n$	Напряжение $\sigma$ , МПа	Перемещение $U$ , мм
Вар. 1.1	0°	4	0,3	0,005	0,005	0,3	97	15,1
Вар. 1.2	180°	4	0,3	0,005	0,005	0,3	90,2	14,8
Вар. 1.3	0°	6	0,3	0,005	0,005	0,3	189,1	46,9
Вар. 1.4	180°	6	0,3	0,005	0,005	0,3	189	4,69
Вар. 1.5	0°	8	0,3	0,005	0,005	0,3	233,7	79
Вар. 1.6	0°	4	0,3	0,005	0,005	0,6	130,4	20
Вар. 1.7	0°	4	0,3	0,005	0,005	0,9	160	23

*Примечание:*  $L$  – длина оправки,  $D$  – диаметр оправки,  $h$  – толщина секторной планки,  $r$  – радиус ферменной конструкции,  $n$  – расстояние между фермами.

Таким образом, были найдены следующие закономерности:

- максимальные напряжения для оправки с углом поворота 180° незначительно ниже напряжений для оправки с углом поворота 0°;

- максимальные перемещения при повороте оправки изменяются незначительно;
- при удлинении оправки напряжения увеличиваются приблизительно на 70–80 %;
- при прорезивании ферм напряжения и перемещения несколько увеличиваются;
- напряжения максимальны в центральных фермах.

В табл. 2 приведен результат исследования поведения конструкции секции оправки под действием нагружающего усилия (давление) размером в 0,6 МПа, приложенного к внешней поверхности секторной планки и собственным весом – второй этап расчетов. Крайняя ферма установлена на расстоянии 10 мм от свободного торца оправки.

Таблица 2

**Расчет секции оправки доработанной модели под действием собственного веса и под действием нагружающего усилия (давление) размером в 0,6 МПа**

Название	$L$	$D$	$h$	$r$	$n$	Вес ( $m$ )	Напряжение $\sigma$ , МПа	Перемещение $U$ , мм
Вар. 2.1	4	0,3	0,015	0,01	0,3	164.63	147,5	8,5
Вар. 2.2	4	0,3	0,015	0,005	0,3	145.93	–	–
Вар. 2.3	4	0,3	0,01	0,01	0,3	116.57	175	9,2
Вар. 2.4	4	0,3	0,005	0,01	0,3	71.65	618,1	13,7
Вар. 2.5	4	0,3	0,015	0,01	0,9	148.47	1040	28,9
Вар. 2.6	4	0,3	0,015	0,01	0,6	102.05	424,7	12,9
Вар. 2.7	4	0,3	0,015	0,01	0,6(0,3)	105.81	625,2	11,7
Вар. 2.8	6	0,3	0,015	0,01	0,3	245.16	237	24,5
Вар. 2.9	9	0,3	0,02	0,015	0,3	544.00	165,9	49,6
Вар. 2.10	4	0,6	0,015	0,01	0,3	324.95	223,2	6,7
Вар. 2.11	4	0,9	0,015	0,01	0,3	510.75	227	3,8
Вар.2.12	4	0,3	0,015	0,01	0,3(0,1)	164.63	146,7	8,5

*Примечание:*  $L$  – длина оправки,  $D$  – диаметр оправки,  $h$  – толщина секторной планки,  $r$  – радиус ферменной конструкции,  $n$  – расстояние между фермами.

Из результатов второго этапа вычислительного эксперимента были сделаны следующие выводы:

- при радиусах стержня фермы, меньших 10 мм, действующие напряжения становятся больше допустимых;
- при толщинах секторной планки, меньших 10 мм, действующие напряжения становятся больше допустимых;
- увеличение расстояния между секторными планками более 0,3 м приводит к значительному увеличению значений максимальных напряжений и перемещений;
- при увеличении длины конструкции до 9 м максимальные напряжения не превышают предел текучести стали;
- при увеличении диаметра конструкции до 0,9 м максимальные напряжения не превышают предел текучести, а максимальные перемещения уменьшаются пропорционально увеличению диаметра.

На третьем этапе рассматривалось воздействие нагружающего усилия (давление) размером в 0,6 МПа, приложенного к внешней поверхности секторной планки. Также учитывался собственный вес конструкции оправки.



Рис. 3. Оправка из трех секций, разбитая на расчетную сетку

Секции ферменной оправки собирались с отступом 100 мм относительно друг друга. На рис. 3 изображена твердотельная модель трех секций ферменной оправки, разбитая на конечно-элементную сетку в сборке. Угол симметрии конструкции  $40^\circ$ .

Ниже приведен результат расчета трехсекционной оправки с учетом контакта между секторными планками. Длина оправки 4 м, диаметр 0,3 м. Толщина секторной планки 15 мм, радиус стержня 10 мм, расстояние между фермами 0,3 м. Коэффициент трения 0,6.

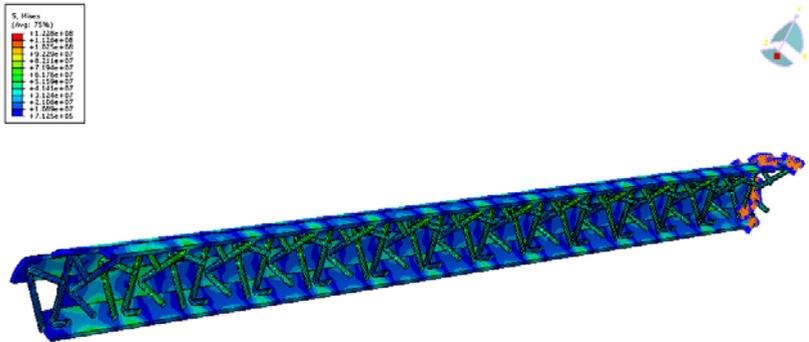


Рис. 4. Распределение полей напряжений, Па. Вид со свободного торца.  
Разрез

При расчете трехсекционной оправки были найдены следующие закономерности:

- при расчете трех секций конструкции оправки в сборке без учета контакта между секторными планками напряжение падает примерно на 12 %, а перемещение примерно на 15% относительно варианта № 2.1;
- при расчете трех секций конструкции оправки в сборке с учетом контакта между секторными планками и с коэффициентом трения равным 0,6, напряжение падает примерно на 16 %, а перемещение – примерно на 27 % относительно аналогичного варианта без учета контакта.