

Оптимальное применение опор при вводе трубопровода в скважину подводного перехода. Часть 2

© Н.Т. Овчинников

ООО «ГеоСплит», Москва, 121205, Россия

Рассмотрена оптимальная расстановка опор в ходе протаскивания трубопровода по скважине при строительстве подводного перехода способом наклонно-направленного бурения. В части 1 работы были приведены результаты применения стержневой модели трубопровода при расположении переходного участка на неподвижных опорах с изменяемой высотой подъема. В части 2 смоделировано использование группы подвижных опор. Первоначально осуществляется рабочий ход группы с движением опор к скважине при уменьшении высоты подъема трубопровода. После останковки в конечном положении проводится перестроение группы с занятием исходного положения для следующего цикла движения. При перемещении опор выполняются условия оптимальности, заключающиеся в отсутствии контактной нагрузки за входом в скважину и минимальности либо напряжений в переходном участке, либо реакций опор. Приведение опор в исходное состояние выполняется переводом первой опоры за последнюю опору или поочередным переездом каждой из опор в необходимое положение. Представленное решение позволяет проводить протаскивание при технологически обусловленном минимуме воздействия монтажных нагрузок на трубопровод.

Ключевые слова: *трубопровод, стержень, подводный переход, скважина, протаскивание, опора, напряжения, изгиб, трубоукладчик, наклонно-направленное бурение*

Введение. При протаскивании трубопровода по скважине подводного перехода наземному участку на монтажной площадке с помощью опор придается форма изгиба, обеспечивающая вход в скважину под необходимым углом. На практике в качестве неподвижных опор применяют трубоукладчики с троллейными подвесками, в качестве подвижных — трубоукладчики с полотенцами.

Преимущества применения подвижных опор — снижение уровня силового воздействия на изоляционное покрытие трубопровода путем исключения относительного движения катков троллейной подвески по нему и некоторое уменьшение усилия протягивания трубопровода. К недостаткам использования подвижных опор можно отнести усложнение порядка их применения из-за необходимости циклического перемещения техники при контроле высотного положения трубопровода.

Цели исследования — решить задачу оптимального использования подвижных опор в пределах переходного участка при протаскивании трубопровода по скважине подводного перехода с определением действующих усилий и напряжений, а также разработать схемы

перемещения таких опор с изменением высоты подъема трубопровода при выполнении условий оптимальности.

Движение опор. На первом этапе циклического движения осуществляется рабочий ход колонны трубоукладчиков с приближением к скважине. Расстояние между первой опорой и входом трубопровода в скважину последовательно уменьшается от начального $l_{1н}$ до конечного $l_{1к} < l_{1н}$ (рис. 1). Длина рабочего хода группы опор $\zeta = l_{1н} - l_{1к}$. В конечном положении группа останавливается, и на втором этапе трубоукладчики отходят от скважины в исходное положение для следующего цикла движения.

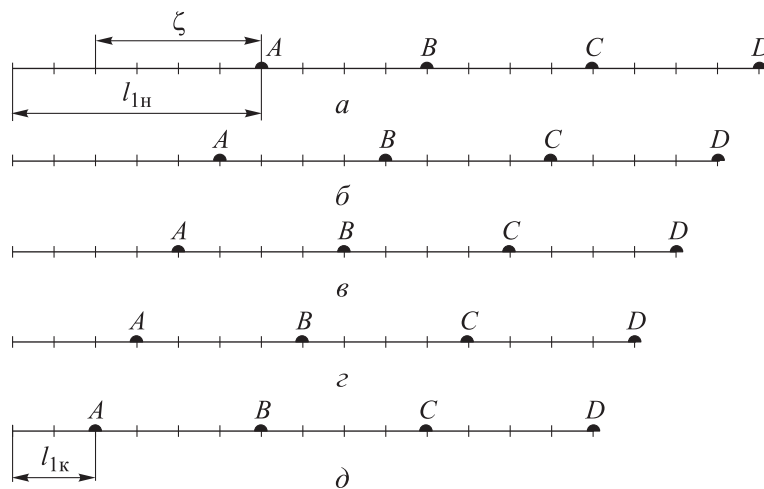


Рис. 1. Рабочий ход опор:

а — начальное положение; *б, в, г* — промежуточные положения; *д* — конечное положение

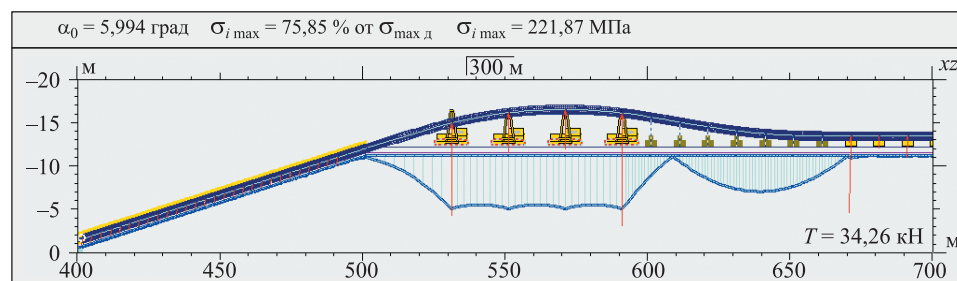
Рассмотрим вопрос формирования и поддержания оптимального состояния трубопровода в процессе прямого и реверсного движения. Условия оптимизации сформулированы в части 1 работы (см. Инженерный журнал: наука и инновации, 2022, вып. 12. DOI: 10.18698/2308-6033-2022-12-2232).

Отсутствие контактной нагрузки за входом трубопровода в скважину является условием оптимизации № 1. Проведем маркировку четырех опор через A, B, C, D . Оптимальную по высоте подъема трубопровода расстановку, обеспечивающую минимальность напряжений в трубопроводе, обозначим, заключив маркеры опор в квадратные скобки — $[A, B, C, D]$. В этом случае выполняются условия оптимизации № 1, № 2. При выполнении минимальности реакций опор применяем фигурные скобки — $\{A, B, C, D\}$, что соответствует выполнению условий оптимизации № 1, № 3.

При движении трубопровода высоту опор необходимо уменьшать по расчету. Для каждой из опор может быть построена траектория снижения соответствующего сечения трубопровода над опорой по мере его продольного перемещения.

Рассмотрим движение группы из четырех опор в расстановке $l_{1н} = 30$ м, $l_{1к} = 10$ м, $l_2 = l_3 = l_4 = 20$ м с длиной рабочего хода $\zeta = 20$ м и интервалом отображения состояния трубопровода $\Delta\zeta = 5$ м. Исходные данные для расчета приведены в части 1 работы.

Рабочий ход при минимальности напряжений в трубопроводе. При перемещении трубопровода к скважине с выполнением условий оптимизации № 1, № 2 необходимо изменять форму трубопровода согласно показанному на рис. 2–6.



Номер опоры i	0	1	2	3	4
Положение l_i , м	0	30	20	20	20
Высота h_i , м	-0,185	2,731	3,919	4,308	3,898
Реакция P_i , кН	0	213,35	91,77	91,77	260,97
Напряжение σ_i , МПа	8,24	221,87	221,87	221,87	221,87
Угол касат. α_i , град	5,994	4,539	2,258	-0,029	-2,317
$P_{i\max} = 260,97$ кН		$h_{i\max} = 4,31$ м		$L_{п} = 170$ м	

Рис. 2. Начальное положение трубопровода в положении $l_1 = 30$ м при минимальности напряжений

Оптимальные формы трубопровода в ходе движения при минимальных напряжениях показаны на совмещенном графике, приведенном на рис. 7. Прерывистыми линиями отображены траектории движения точек оси трубопровода над опорами.

Снижение точек оси трубопровода в зависимости от положения первой опоры приведено на рис. 8. В частности, высота подъема трубопровода на второй опоре должна последовательно, линейным образом, снижаться в пределах диапазона $\Delta h_2 = 3,919 - 2,113 = 1,806$ м с уменьшением напряжений в трубопроводе на величину $\Delta\sigma_{\max} = 221,87 - 198,62 = 23,25$ МПа (рис. 9).

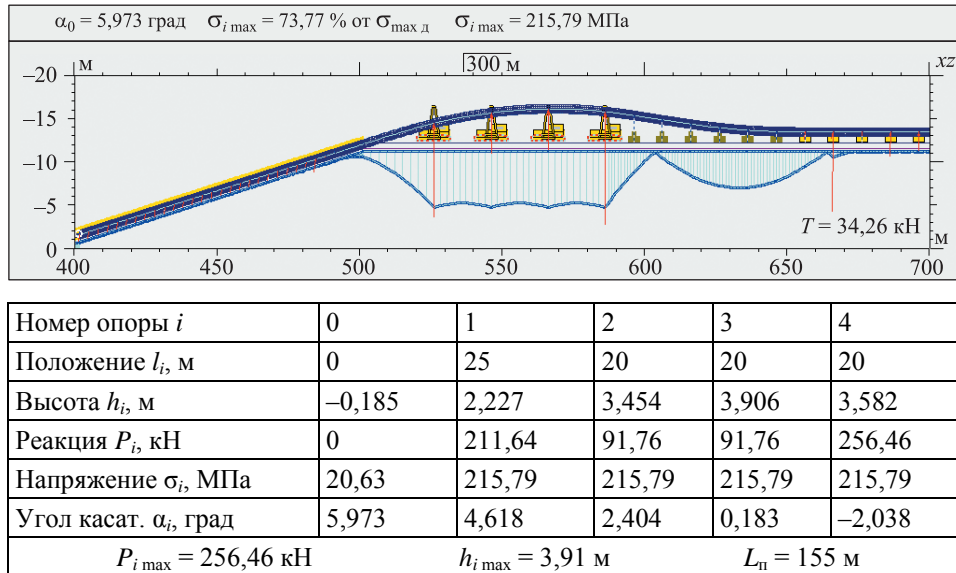


Рис. 3. Трубопровод при минимальности напряжений в положении $l_1 = 25$ м

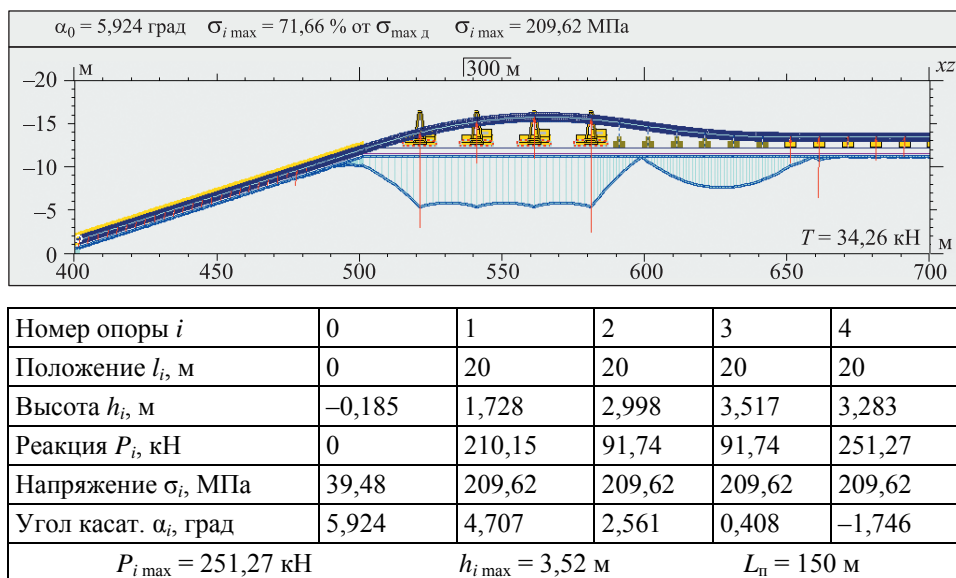
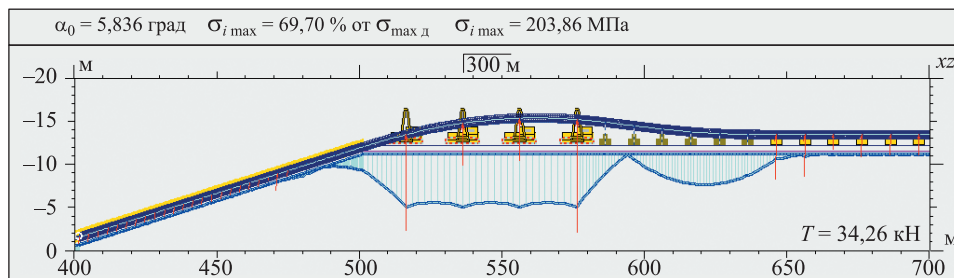
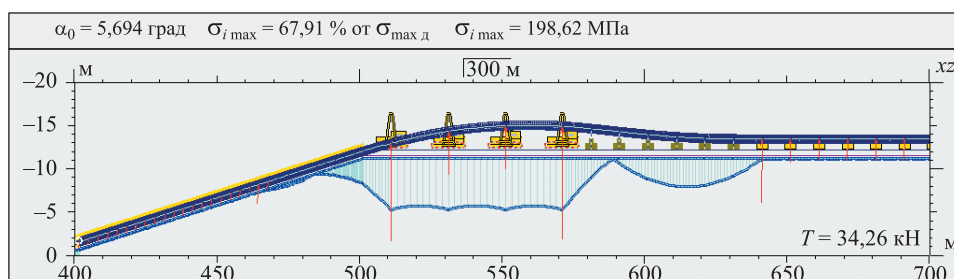


Рис. 4. Трубопровод при минимальности напряжений в положении $l_1 = 20$ м



Номер опоры i	0	1	2	3	4
Положение l_i , м	0	15	20	20	20
Высота h_i , м	-0,185	1,234	2,550	3,136	2,992
Реакция P_i , кН	0	209,16	91,72	91,72	246,30
Напряжение σ_i , МПа	65,20	203,86	203,86	203,86	203,86
Угол касат. α_i , град	5,836	4,805	2,722	0,632	-1,459
$P_{i \max} = 246,30$ кН		$h_{i \max} = 3,14$ м		$L_{\pi} = 145$ м	

Рис. 5. Трубопровод при минимальности напряжений в положении $l_1 = 15$ м



Номер опоры i	0	1	2	3	4
Положение l_i , м	0	10	20	20	20
Высота h_i , м	-0,185	0,749	2,113	2,766	2,710
Реакция P_i , кН	0	208,76	91,71	91,71	241,59
Напряжение σ_i , МПа	98,42	198,62	198,62	198,62	198,62
Угол касат. α_i , град	5,694	4,912	2,887	0,855	-1,179
$P_{i \max} = 241,59$ кН		$h_{i \max} = 2,77$ м		$L_{\pi} = 140$ м	

Рис. 6. Конечное положение трубопровода при минимальности напряжений в положении $l_1 = 10$ м

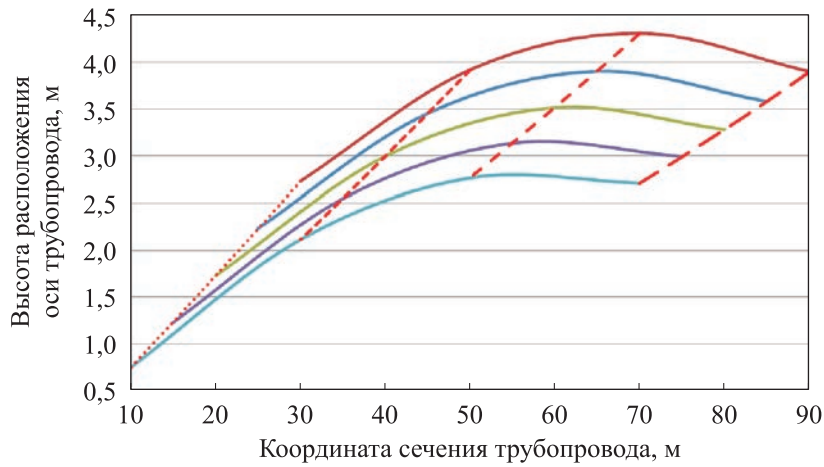


Рис. 7. Формы трубопровода в ходе движения к скважине при минимальности напряжений и при разных значениях l_1 :
 $l_1 = 30$ м (—); $l_1 = 25$ м (—); $l_1 = 20$ м (—); $l_1 = 15$ м (—); $l_1 = 10$ м (—);
 траектории движения точек оси трубопровода над опорами 1 (.....), 2 (-----), 3 (---),
 4 (----)

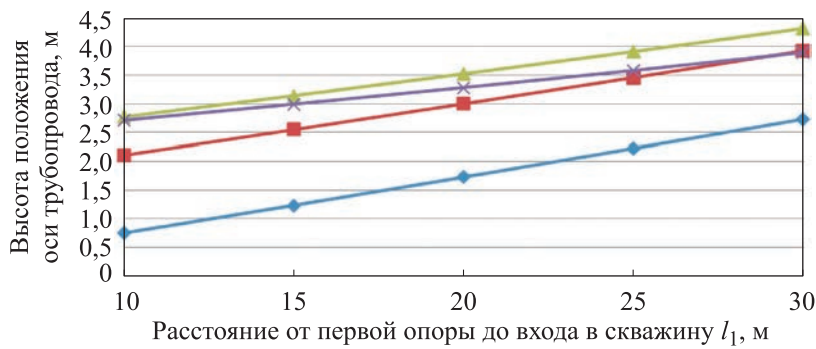


Рис. 8. Снижение высоты подъема трубопровода на опорах в ходе движения к скважине при минимальности напряжений:
 — опора 1; — опора 2; — опора 3; — опора 4

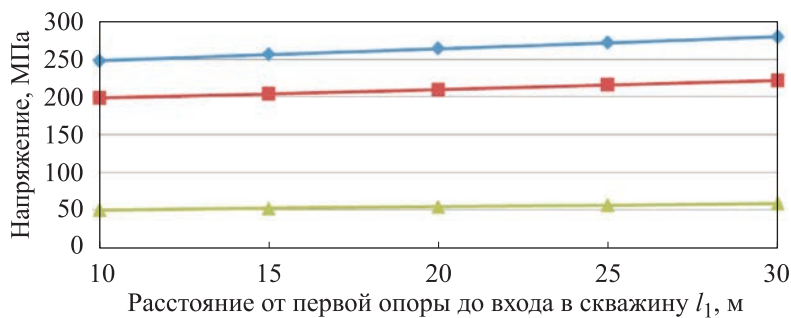
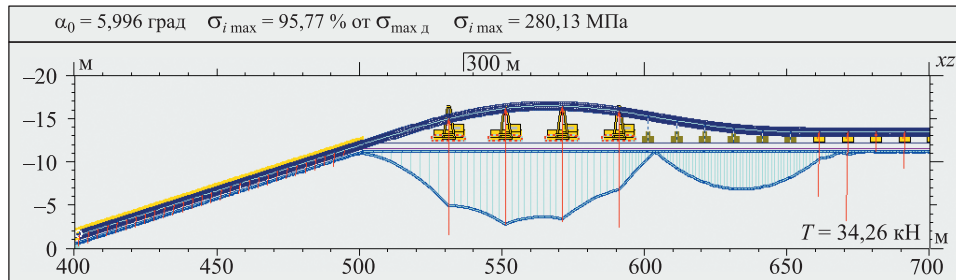


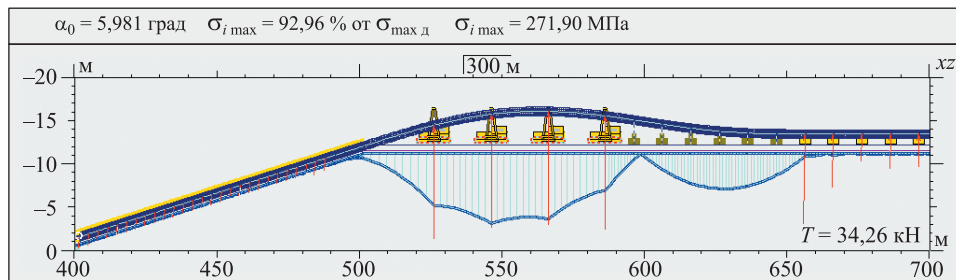
Рис. 9. Уменьшение напряжений в трубопроводе при движении к скважине с выполнением условий оптимизации № 1, № 2 и № 1, № 3:
 — при минимальности напряжений; — при минимальности усилий;
 — разность напряжений

Рабочий ход при минимальности усилий. Движение трубопровода при минимальности усилий опор с выполнением условий оптимизации № 1, № 3 отображено на рис. 10–14.



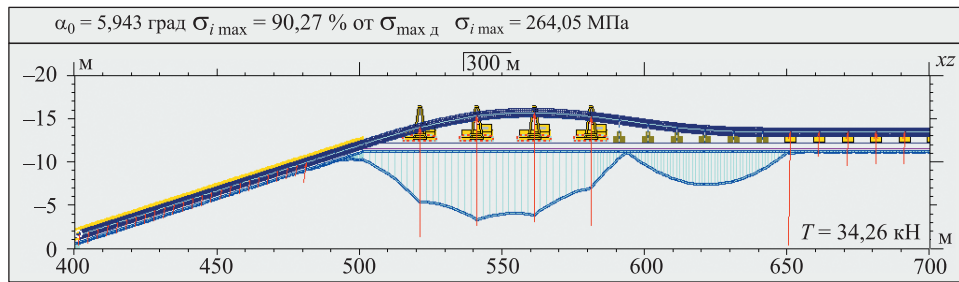
Номер опоры i	0	1	2	3	4
Положение l_i , м	0	30	20	20	20
Высота h_i , м	-0,185	2,759	3,976	4,233	3,604
Реакция P_i , кН	0	157,02	157,02	157,02	157,02
Напряжение σ_i , МПа	6,07	207,48	280,13	259,99	146,75
Угол касат. α_i , град	5,996	4,679	2,158	-0,655	-2,740
$P_{i \max} = 157,02$ кН		$h_{i \max} = 4,23$ м		$L_{\pi} = 160$ м	

Рис. 10. Начальное положение трубопровода при минимальности усилий в положении $l_1 = 30$ м



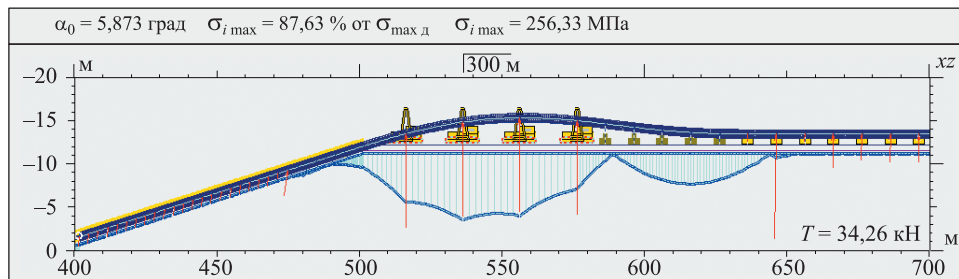
Номер опоры i	0	1	2	3	4
Положение l_i , м	0	25	20	20	20
Высота h_i , м	-0,185	2,254	3,516	3,846	3,316
Реакция P_i , кН	0	155,37	155,37	155,37	155,37
Напряжение σ_i , МПа	16,42	200,26	271,90	253,08	143,50
Угол касат. α_i , град	5,981	4,760	2,327	-0,403	-2,433
$P_{i \max} = 155,37$ кН		$h_{i \max} = 3,85$ м		$L_{\pi} = 155$ м	

Рис. 11. Трубопровод при минимальности усилий в положении $l_1 = 25$ м



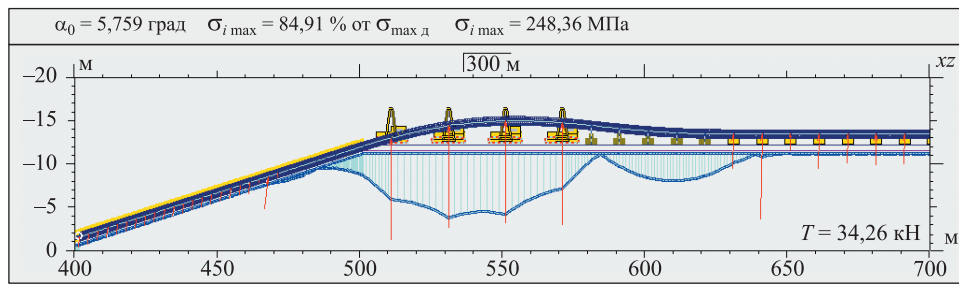
Номер опоры i	0	1	2	3	4
Положение l_i , м	0	20	20	20	20
Высота h_i , м	-0,185	1,753	3,061	3,466	3,034
Реакция P_i , кН	0	153,85	153,85	153,85	153,85
Напряжение σ_i , МПа	32,77	193,13	264,05	246,65	140,64
Угол касат. α_i , град	5,943	4,852	2,501	-0,150	-2,130
$P_{i \max} = 153,85$ кН		$h_{i \max} = 3,47$ м		$L_{\pi} = 150$ м	

Рис. 12. Трубопровод при минимальности усилий в положении $l_1 = 20$ м



Номер опоры i	0	1	2	3	4
Положение l_i , м	0	15	20	20	20
Высота h_i , м	-0,185	1,258	2,616	3,100	2,768
Реакция P_i , кН	0	152,36	152,36	152,36	152,36
Напряжение σ_i , МПа	55,33	185,81	256,33	240,62	138,40
Угол касат. α_i , град	5,873	4,955	2,686	0,111	-1,824
$P_{i \max} = 152,36$ кН		$h_{i \max} = 3,10$ м		$L_{\pi} = 135$ м	

Рис. 13. Трубопровод при минимальности усилий в положении $l_1 = 15$ м



Номер опоры i	0	1	2	3	4
Положение l_i , м	0	10	20	20	20
Высота h_i , м	-0,185	0,768	2,183	2,751	2,526
Реакция P_i , кН	0	150,73	150,73	150,73	150,73
Напряжение σ_i , МПа	84,20	178,00	248,36	234,77	137,00
Угол касат. α_i , град	5,759	5,072	2,890	0,391	-1,505
$P_{i \max} = 150,73$ кН		$h_{i \max} = 2,75$ м		$L_{\text{п}} = 130$ м	

Рис. 14. Конечное положение трубопровода при минимальности усилий в положении $l_1 = 10$ м

Для сравнения формы участка трубопровода над опорами при выполнении условий оптимизации № 1, № 2 и № 1, № 3 (см. рис. 2 и рис. 10) при $l_1 = 30$ м проведены на рис. 15. Наибольшее расхождение форм изгиба участка по высоте расположения достигается на третьей и четвертой опорах.

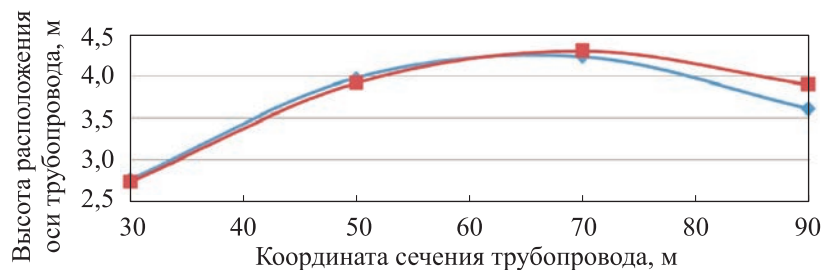


Рис. 15. Формы трубопровода при минимальности усилий (—◆—) и при минимальности напряжений (—■—) в начальном положении $l_1 = 30$ м

Изменение формы трубопровода по мере движения в варианте с минимизацией действующих усилий отображено на рис. 16. Данные формы отличаются от форм с минимизацией напряжений (см. рис. 7) координатами точек оси при качественном подобии.

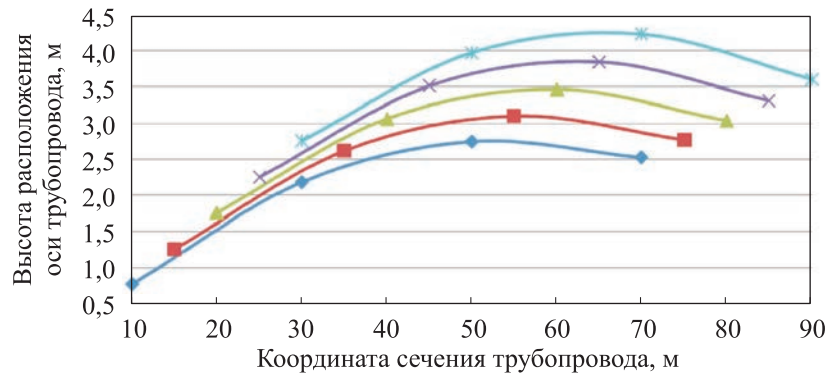


Рис. 16. Формы трубопровода в ходе движения к скважине при минимальности усилий:

$l_1 = 10$ м (♦); $l_1 = 15$ м (■); $l_1 = 20$ м (▲); $l_1 = 25$ м (×); $l_1 = 30$ м (✱)

При выдерживании минимальности усилий уровень напряжений в трубопроводе повышается, $\Delta\sigma_{\max} \approx 50$ МПа (см. рис. 9), а при обеспечении минимальности напряжений возрастают действующие усилия, $\Delta P_{\max} \approx 100$ кН (рис. 17). Таким образом, при необходимости уменьшить действующее на трубопровод максимальное усилие на величину $\Delta P_{\max} \approx 10$ кН придется принять прирост напряжений в трубопроводе $\Delta\sigma_{\max} \approx 5$ МПа.

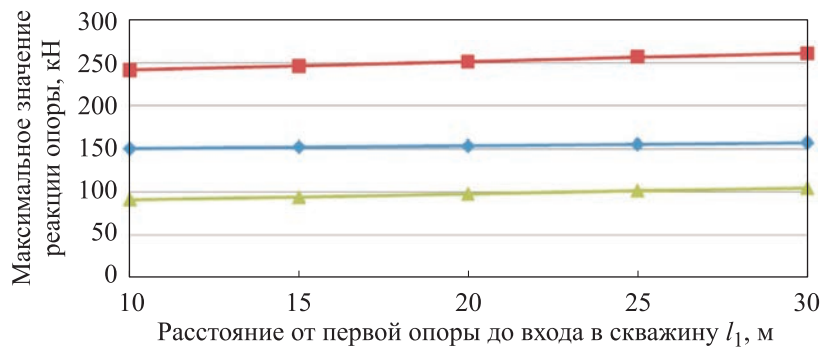
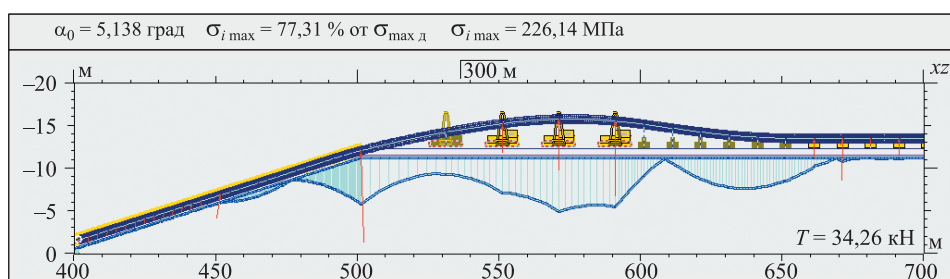


Рис. 17. Снижение максимальных значений реакций опор по ходу движения к скважине при минимальности напряжений (■) и усилий (♦); разность усилий (▲)

Рабочий ход без изменения формы трубопровода. Рассмотрим возможность перемещения переходного участка при постоянстве его формы по типу бегущей волны. Наличие такой возможности могло бы значительно упростить контроль параметров расстановки опор в ходе протягивания трубопровода. В качестве фиксированной формы примем оптимизированное положение трубопровода в центре интервала движения при $l_i = 20$ м с высотой подъема трубопровода $h_1 = 1,728$ м, $h_2 = 2,998$ м, $h_3 = 3,517$ м, $h_4 = 3,283$ м (см. рис. 4).

В начальном положении при $l_1 = 30$ м, $l_2 = l_3 = l_4 = 20$ м не удается получить требуемую форму, поскольку трубопровод проходит выше необходимой отметки, $h_1 = 1,965$ м $>$ $1,728$ м, при совпадении других высот (рис. 18). В результате первая опора становится неактивной с нулевой реакцией $P_1 = 0$. Происходит нежелательное разгружение трубопровода на грунт за входом в скважину с контактным усилием $P_0 = 291,30$ кН.

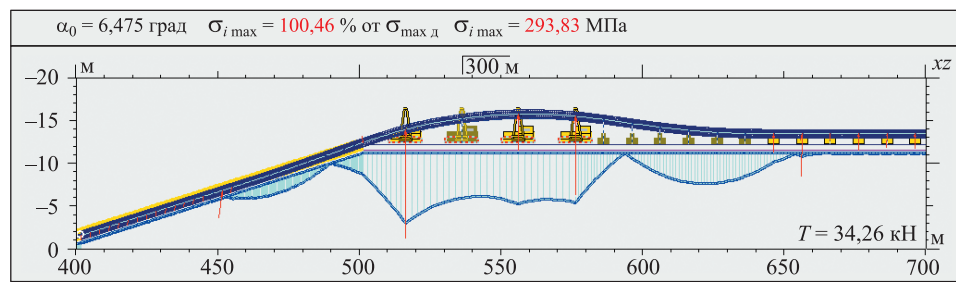


Номер опоры i	0	1	2	3	4
Положение l_i , м	0	30	20	20	20
Высота h_i , м	-0,185	1,965	2,998	3,517	3,283
Реакция P_i , кН	291,30	0	89,99	160,17	237,41
Напряжение σ_i , МПа	194,47	68,76	146,77	226,14	207,28
Угол касат. α_i , град	5,138	3,408	2,365	0,463	-1,769
$P_{i \max} = 291,30$ кН		$h_{i \max} = 3,52$ м		$L_{\text{п}} = 160$ м	

Рис. 18. Трубопровод на четырех опорах при $l_1 = 30$ м, $l_2 = l_3 = l_4 = 20$ м

После перемещения в положение $l_1 = 15$ м (рис. 19) в неактивное состояние переходит вторая опора, $P_2 = 0$, при $h_2 = 3,0$ м, так как трубопровод проходит выше необходимой отметки $h_2 = 2,998$ м. Напряжения в участке незначительно превышают допустимое значение, $\sigma_1 = 293,83$ МПа (100,46 % от $\sigma_{\text{max д}}$). Трубопровод начинает оказывать давление вверх на свод скважины с усилием $P_0 = 19,37$ кН.

Дальнейшее движение опор к скважине до $l_1 = 10$ м приведет к быстрому нарастанию напряжений в трубопроводе и боковых реакций, превышению предела текучести материала и деформированию по типу изготовления отвода холодного гнутья трубогибочным станком. В результате произойдет увеличение усилия протаскивания трубопровода, и не исключено повреждение изоляционного покрытия.



Номер опоры i	0	1	2	3	4
Положение l_i , м	0	15	20	20	20
Высота h_i , м	0,185	1,728	3,000	3,517	3,283
Реакция P_i , кН	19,37	342,81	0	114,11	247,03
Напряжение σ_i , МПа	91,26	293,83	188,44	214,67	208,87
Угол касат. α_i , град	6,475	4,976	2,489	0,424	-1,754
$P_{i \max} = 342,81$ кН		$h_{i \max} = 3,52$ м		$L_{\text{п}} = 145$ м	

Рис. 19. Трубопровод на четырех опорах при $l_1 = 15$ м, $l_2 = l_3 = l_4 = 20$ м

Закключаем, что осуществление рабочего хода без уменьшения высоты подъема переходного участка при протаскивании трубопровода недопустимо.

Перевод опор в исходное положение за счет переезда первой опоры при минимальности напряжений. Рассмотрим возвращение опор в исходное положение во второй фазе движения (рис. 20).

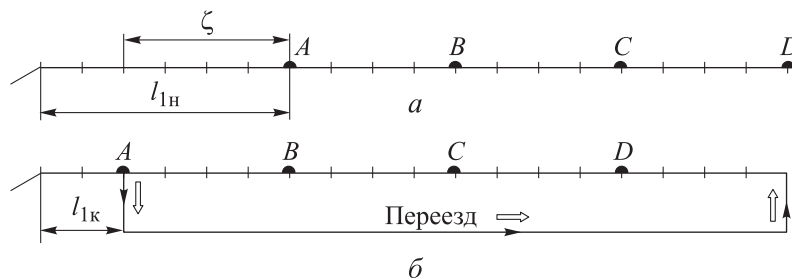
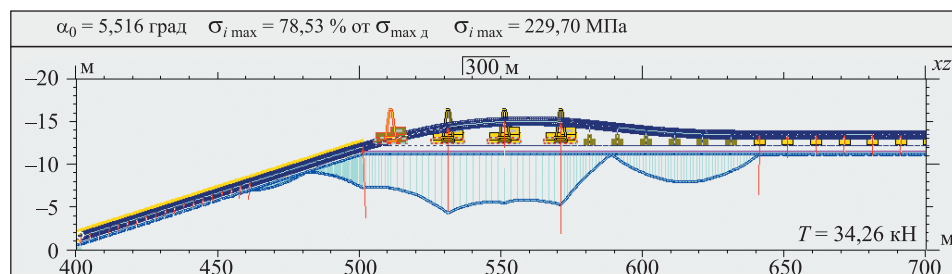


Рис. 20. Группа опор при движении:

a — начальное положение при движении к скважине; b — конечное положение и перемещение первой опоры с образованием исходного положения

В положении трубопровода, представленного на рис. 6, освобождаем первую опору А. Эта опора играет основную роль в вопросе снятия контактной нагрузки на входе в скважину, при ее отключении в прилегающей к входу в скважину зоне L_k появляется контактное усилие $P_0 = 159,17$ кН (рис. 21). Отметим, что опасность разгрузки

трубопровода на грунт в отсутствие относительного движения снижается, силы сопротивления движению на опорах и в точке контакта трубопровода с грунтом не действуют.



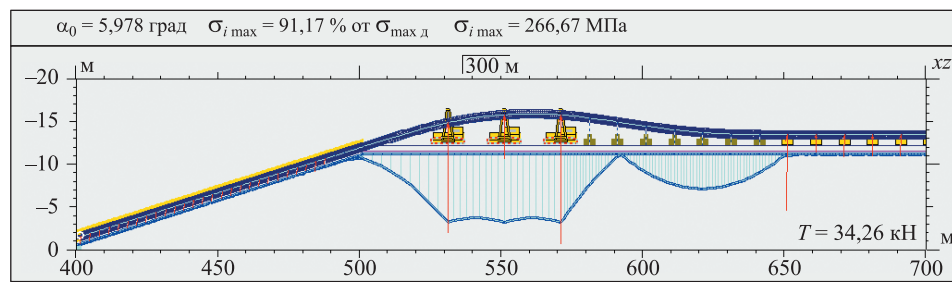
Номер опоры i	0	1	2	3	4
Положение l_i , м	0	10	20	20	20
Высота h_i , м	-0,185	0,717	2,113	2,766	2,710
Реакция P_i , кН	159,17	0	186,93	58,07	248,26
Напряжение σ_i , МПа	132,74	132,41	229,70	190,59	199,71
Угол касат. α_i , град	5,516	4,820	2,985	0,828	-1,168
$P_{i \max} = 248,26$ кН		$h_{i \max} = 2,77$ м		$L_{\text{п}} = 140$ м	

Рис. 21. Положение трубопровода на трех опорах после освобождения первой опоры при минимальности напряжений при $l_1 = 10$ м, $l_2 = l_3 = l_4 = 20$ м

Дальнейшие действия определяются отношением к возможности разгрузки трубопровода на грунт:

- при допустимости разгрузки по физическим характеристикам грунта переводим первую опору в положение за последней опорой с получением последовательности расположения опор B, C, D, A ;
- при нежелательности разгрузки из-за возможности повреждения изоляционного покрытия трубопровода переводим в оптимальное высотное положение трубопровод на трех остающихся опорах при минимальных напряжениях [B, C, D] (рис. 22). Затем первую опору перемещаем в положение за последней опорой с получением расстановки B, C, D, A .

После переезда первой опоры вследствие равномерности расстановки опор вся группа занимает исходное положение по горизонтали для последующего движения. Далее корректируем высотное положение переходного участка с четырьмя опорами до оптимального [B, C, D, A] (см. рис. 2). Опора B становится первой опорой в группе, соответственно изменяется нумерация других опор. Протаскивание трубопровода продолжается. Через несколько циклов движения опоры образуют начальную последовательность расположения A, B, C, D .



Номер опоры i	0	1	2	3
Положение l_i , м	0	30	20	20
Высота h_i , м	-0,185	2,632	3,576	3,551
Реакция P_i , кН	0	230,53	92,47	270,53
Напряжение σ_i , МПа	17,66	266,67	266,67	266,67
Угол касат. α_i , град	5,978	4,085	1,316	-1,459
$P_{i \max} = 270,53$ кН		$h_{i \max} = 3,58$ м		$L_{\text{п}} = 150$ м

Рис. 22. Оптимальное положение трубопровода на трех опорах при минимальности напряжений в положении $l_1 = 30$ м, $l_2 = l_3 = 20$ м

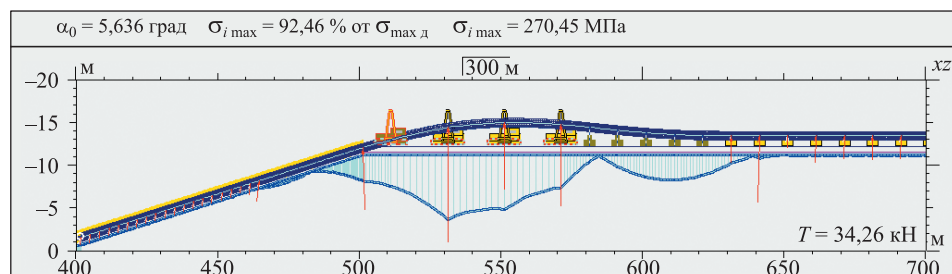
Исключение контактной нагрузки на трубопровод при трех опорах (см. рис. 22) происходит при допустимых, но высоких напряжениях в трубопроводе $\sigma_{\max} = 266,67$ МПа (91,17 % от $\sigma_{\max \text{ д}}$). Последствия отказа одной из опор при таком уровне напряжений могут оказаться неприемлемыми.

Вертикальный подъем трубопровода в исходное положение, показанное на рис. 2, на опорах из положения, отображенного на рис. 22, может быть проведен пошагово с расчетным контролем напряженного состояния при каждом элементарном изменении высоты опор.

Занятие исходного положения за счет подключения дополнительной опоры. В этом варианте действий по завершении рабочего хода за последней опорой ставим резервную опору с выводом первой опоры в резерв для последующего использования. Переходный участок переводим в оптимальное высотное положение (см. рис. 2) и продолжаем протаскивание. Преимуществом данного варианта является более низкий уровень напряжений в переходном участке, так как при протаскивании число поддерживающих трубопровод опор остается неизменным.

Перевод опор в исходное положение за счет переезда первой опоры при минимальности усилий. Рассмотрим перемещение первой опоры за четвертую опору в расстановке с выдерживанием минимальности действующих на трубопровод усилий. В положении,

показанном на рис. 14, освободим первую опору, получив состояние с неравными напряжениями в трубопроводе и различными реакциями опор (рис. 23).



Номер опоры i	0	1	2	3	4
Положение l_i , м	0	10	20	20	20
Высота h_i , м	-0,185	0,745	2,183	2,751	2,526
Реакция P_i , кН	117,49	0	218,52	126,73	155,61
Напряжение σ_i , МПа	110,10	130,82	270,45	229,04	137,85
Угол касат. α_i , град	5,636	5,006	2,960	0,371	-1,497
$P_{i \max} = 218,52$ кН		$h_{i \max} = 2,75$ м		$L_{\Pi} = 130$ м	

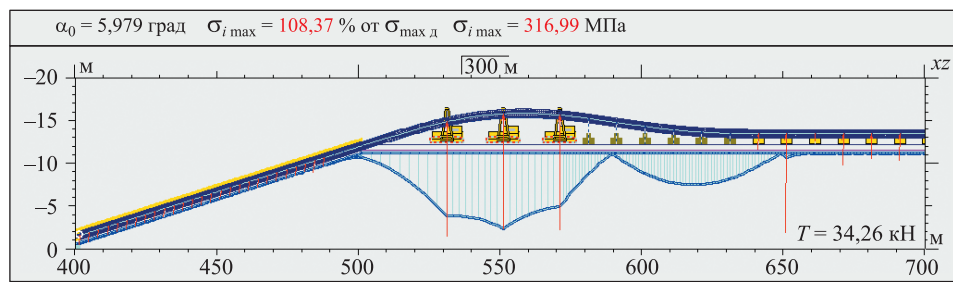
Рис. 23. Положение трубопровода на трех опорах после освобождения первой опоры из четырех при минимальности усилий в положении

$$l_1 = 10 \text{ м}, l_2 = l_3 = l_4 = 20 \text{ м}$$

При допустимости разгрузки трубопровода на грунт первая опора перемещается за четвертую опору с расположением опор в последовательности B, C, D, A . При нежелательности разгрузки контактная реакция исключается реализацией оптимального высотного положения трубопровода на трех остающихся опорах при равных усилиях $\{B, C, D\}$ (рис. 24). Затем первую опору перемещаем за четвертую опору с получением расстановки B, C, D, A . Устранение контактной нагрузки ($P_0 = 0$) приводит к незначительному уменьшению максимальной реакции опор $\Delta P_{\max} = 218,52 - 193,45 = 25,07$ кН при повышении максимальных напряжений $\Delta \sigma_{\max} = 316,99 - 270,45 = 46,54$ МПа.

Далее обеспечивается оптимальное высотное положение переходного участка с четырьмя опорами при минимальности усилий $\{B, C, D, A\}$ (см. рис. 10), после чего протаскивание трубопровода продолжается.

При исключении контактной нагрузки, действующей в положении, отраженном на рис. 23, напряжения в трубопроводе превысили установленное ограничение (см. рис. 24).



Номер опоры i	0	1	2	3
Положение l_i , м	0	30	20	20
Высота h_i , м	-0,185	2,637	3,559	3,412
Реакция P_i , кН	0	193,45	193,45	193,45
Напряжение σ_i , МПа	17,19	264,68	316,99	225,00
Угол касат. α_i , град	5,979	4,107	1,074	-1,748
$P_{i \max} = 193,45$ кН		$h_{i \max} = 3,56$ м		$L_{\text{п}} = 140$ м

Рис. 24. Оптимальное положение трубопровода на трех опорах после освобождения первой опоры из четырех при минимальности усилий в положении

$$l_1 = 10 \text{ м}, l_2 = l_3 = l_4 = 20 \text{ м}$$

Перевод опор в исходное положение способом перехвата при минимальности напряжений. В этом варианте перестройки группы осуществляется поочередное перемещение каждой из опор назад в исходное положение на величину рабочего хода согласно схеме, приведенной на рис. 25.

Практическая применимость способа неочевидна вследствие образования увеличенных длин пролетов в промежуточных положениях во время перемещения опор, что требует проведения теоретического исследования вопроса.

Отметим, что занятие исходного положения группы поочередным движением опор назад позволяет выполнять рабочий ход при неравных длинах пролетов, однако для упрощения рассмотрим движение опор с равными длинами пролетов $l_2 = l_3 = l_4$ (рис. 26–32).

Трубопровод находится в наиболее напряженном состоянии в ходе переезда назад первой опоры, $\sigma_{\max} = 305,75$ МПа (104,53 % от $\sigma_{\max \text{ д}}$) (см. рис. 32). Максимальная нагрузка на опоры создается при отходе назад опоры С в положении, показанном на рис. 28, $P_{\max} = P_3 = 337,13$ кН.

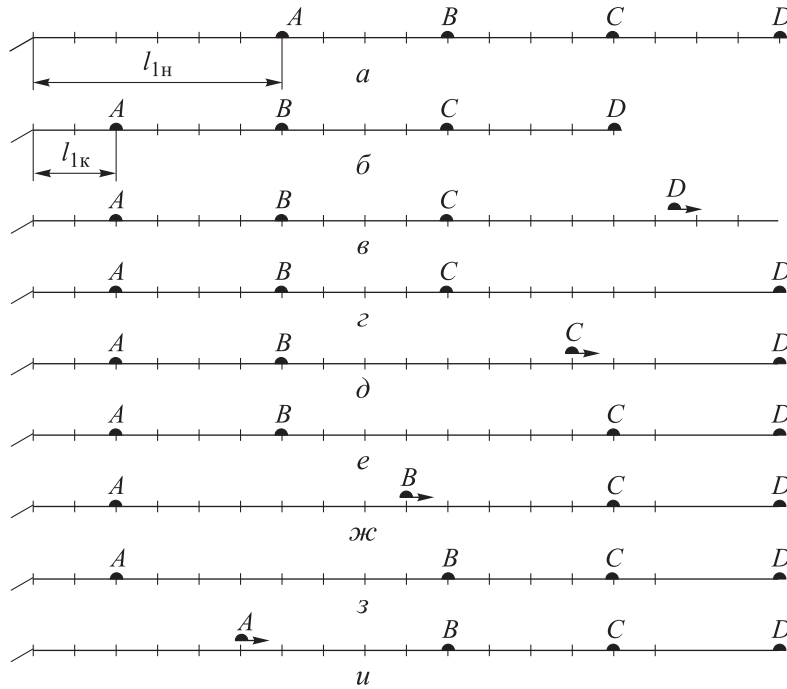
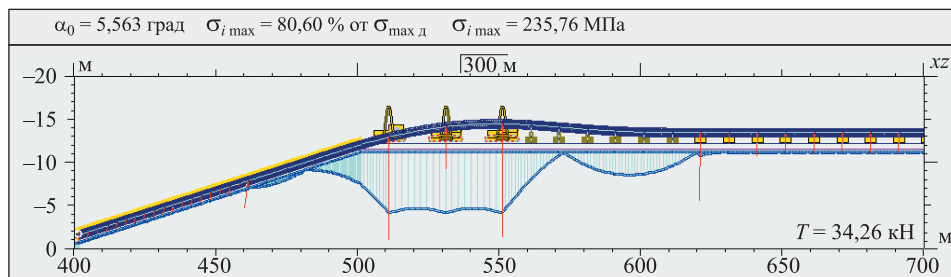


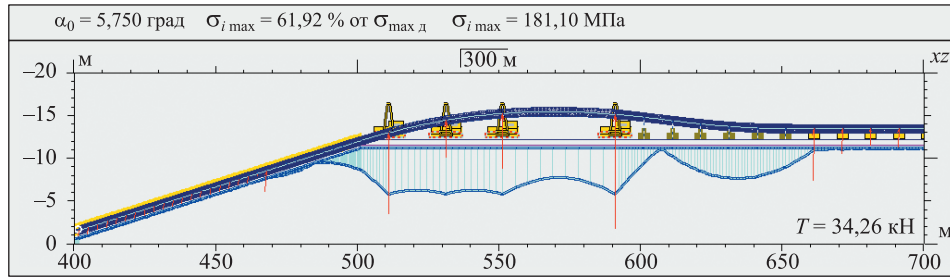
Рис. 25. Схема поочередного отхода опор назад:

a, б — начальное и конечное положение опор; *в-и* — состояние при перемещении и подключении опор



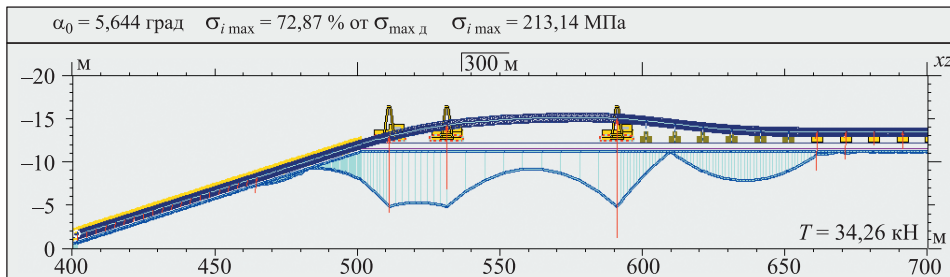
Номер опоры i	0	1	2	3
Положение l_i , м	0	10	20	20
Высота h_i , м	-0,185	0,711	1,899	2,235
Реакция P_i , кН	0	224,43	92,34	247,71
Напряжение σ_i , МПа	124,68	235,76	235,76	235,76
Угол касат. α_i , град	5,563	4,610	2,181	-0,256
$P_{i \max} = 247,71$ кН		$h_{i \max} = 2,23$ м		$L_{\Pi} = 120$ м

Рис. 26. Трубопровод при отходе назад опоры D (рис. 25, *в*) в случае минимальности напряжений



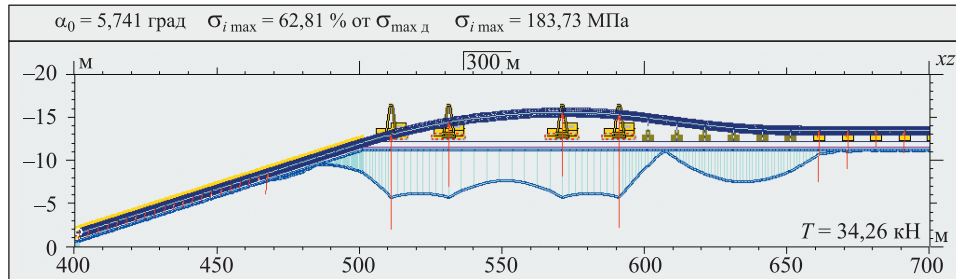
Номер опоры i	0	1	2	3	4
Положение l_i , м	0	10	20	20	40
Высота h_i , м	-0,185	0,765	2,210	3,011	2,928
Реакция P_i , кН	0	200,97	91,35	136,65	283,94
Напряжение σ_i , МПа	86,29	181,10	181,10	181,10	181,10
Угол касат. α_i , град	5,750	5,048	3,213	1,371	-1,608
$P_{i \max} = 283,94$ кН		$h_{i \max} = 3,01$ м		$L_{\text{п}} = 160$ м	

Рис. 27. Трубопровод при подключении опоры D (рис. 25, з) в случае минимальности напряжений



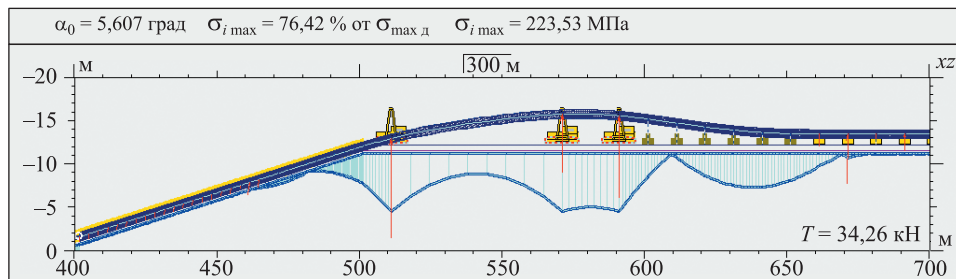
Номер опоры i	0	1	2	3	
Положение l_i , м	0	10	20	60	
Высота h_i , м	-0,185	0,734	2,029	2,799	
Реакция P_i , кН	0	214,83	181,93	337,13	
Напряжение σ_i , МПа	108,59	213,14	213,14	213,14	
Угол касат. α_i , град	5,644	4,795	2,611	-1,142	
$P_{i \max} = 337,13$ кН		$h_{i \max} = 2,80$ м		$L_{\text{п}} = 160$ м	

Рис. 28. Трубопровод при отходе назад опоры C (рис. 25, д) в случае минимальности напряжений



Номер опоры i	0	1	2	3	4
Положение l_i , м	0	10	20	40	20
Высота h_i , м	-0,185	0,763	2,195	3,346	3,064
Реакция P_i , кН	0	202,12	136,69	136,69	240,96
Напряжение σ_i , МПа	88,10	183,73	183,73	183,73	183,73
Угол касат. α_i , град	5,741	5,027	3,164	0,130	-1,743
$P_{i \max} = 240,96$ кН		$h_{i \max} = 3,35$ м		$L_{\text{п}} = 160$ м	

Рис. 29. Трубопровод при подключении опоры С (рис. 25, е) в случае минимальности напряжений



Номер опоры i	0	1	2	3	
Положение l_i , м	0	10	60	20	
Высота h_i , м	-0,185	0,724	3,524	3,341	
Реакция P_i , кН	0	309,43	182,14	256,08	
Напряжение σ_i , МПа	115,98	223,53	223,53	223,53	
Угол касат. α_i , град	5,607	4,709	0,629	-1,678	
$P_{i \max} = 309,43$ кН		$h_{i \max} = 3,52$ м		$L_{\text{п}} = 160$ м	

Рис. 30. Трубопровод при отходе назад опоры В (рис. 25, ж) в случае минимальности напряжений

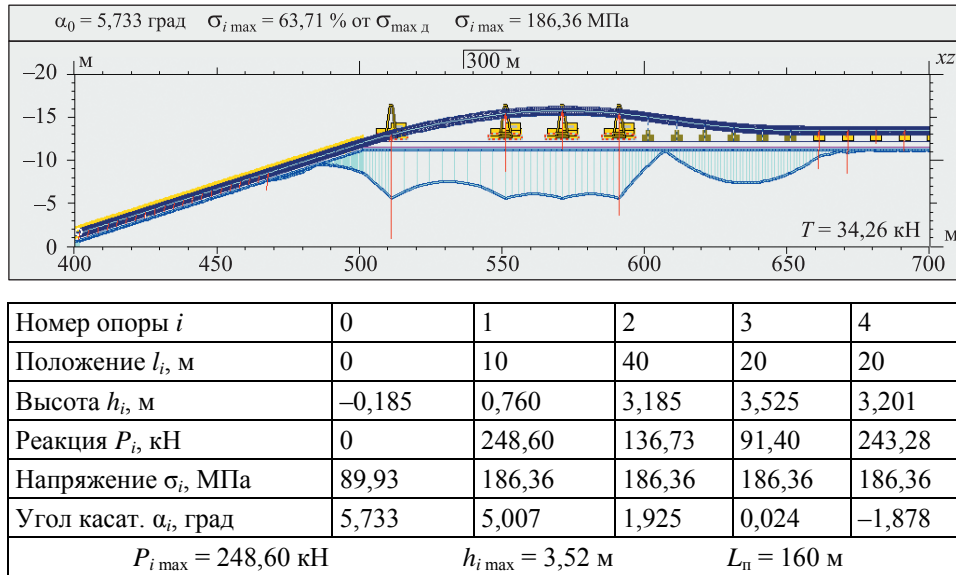


Рис. 31. Трубопровод при подключении опоры В (рис. 25, з) в случае минимальности напряжений

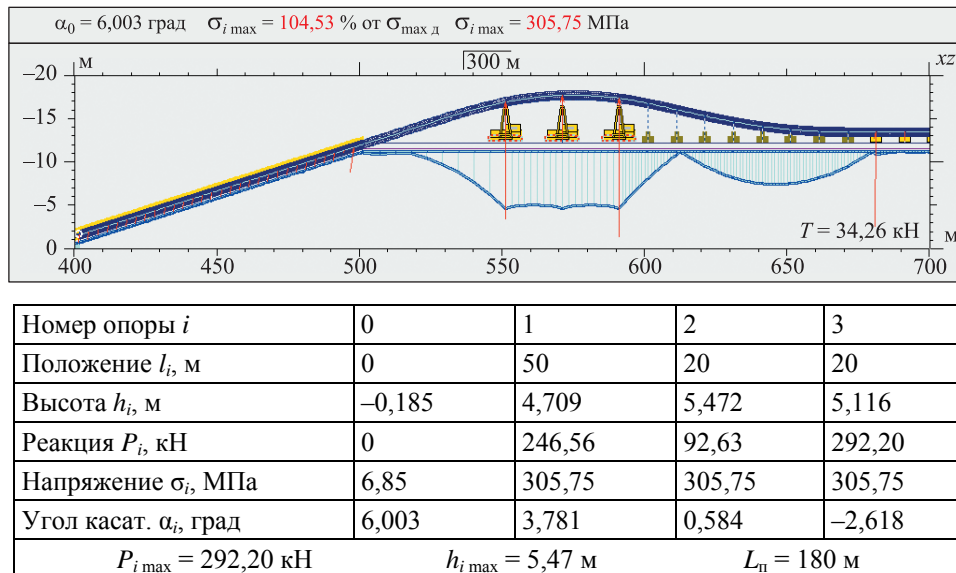


Рис. 32. Трубопровод при отходе назад опоры А (рис. 25, и) при минимальности напряжений

После подключения опоры А получаем исходное состояние группы опор, как на рис. 2 и рис. 25, а, для движения в следующем цикле.

Максимальные напряжения в трубопроводе и максимальное значение реакции опоры от одного оптимального состояния к другому изменяются волнообразно за счет изменения числа задействованных опор (рис. 33, 34).

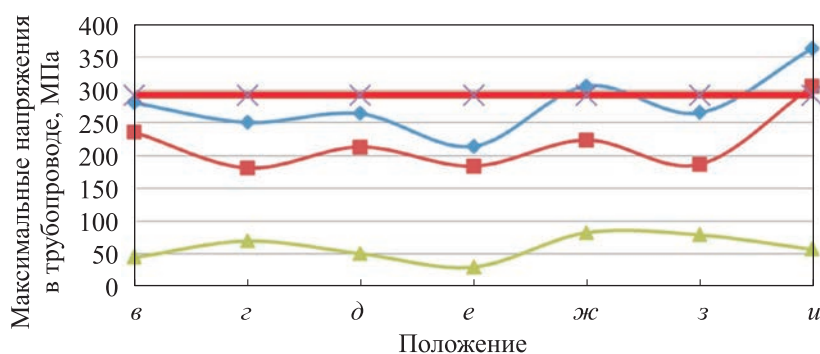


Рис. 33. Максимальные напряжения в трубопроводе при перестановке опор (см. рис. 25, в–и) при соблюдении условий минимальности напряжений (—■—) и усилий (—◆—); —▲— разность напряжений, —■— допустимое значение напряжений

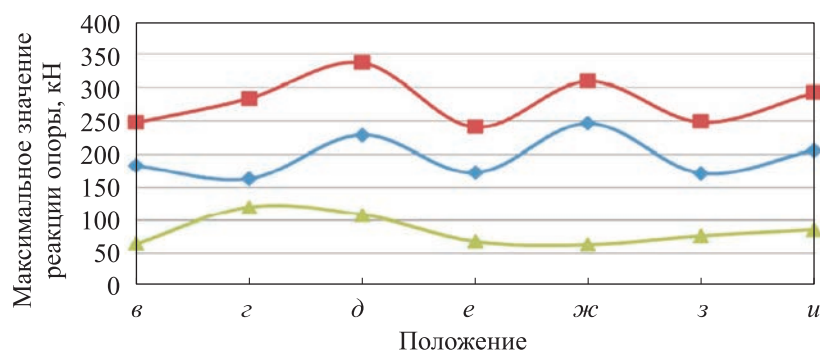


Рис. 34. Максимальные значения реакций опор при перестановке опор (см. рис. 25, в–и) с выполнением условий минимальности напряжений (—■—) и усилий (—◆—); —▲— разность максимальных реакций

Несмотря на существенное увеличение длин пролетов, значительная часть графика напряжений расположена ниже допустимых значений (см. рис. 33). По поводу частичного превышения допустимых напряжений в расчетном примере можно высказать следующие соображения. В части 1 работы показано уменьшение напряжений в переходном участке при наличии в скважине бурового раствора, и в этом случае допустимые напряжения уже не будут превышены. Для снижения напряжений можно также дополнительно подключить вспомогательную подвижную опору в пределах удлиненного пролета или уменьшить длину рабочего хода группы опор. Кроме того, при протаскивании трубопроводов с меньшим диаметром уровень действующих

напряжений в нем понизится. Нельзя также исключить и назначение более высокого предела допустимых напряжений $\sigma_{\max д}$. Приведенные положения свидетельствуют о возможности практического применения рассмотренной схемы движения опор с трубопроводом.

Перевод опор в исходное положение способом перехвата при минимальных усилиях. Рассмотрим перемещение опор назад по одной при выдерживании условия минимальности усилий, действующих на трубопровод со стороны опор (рис. 35–41).

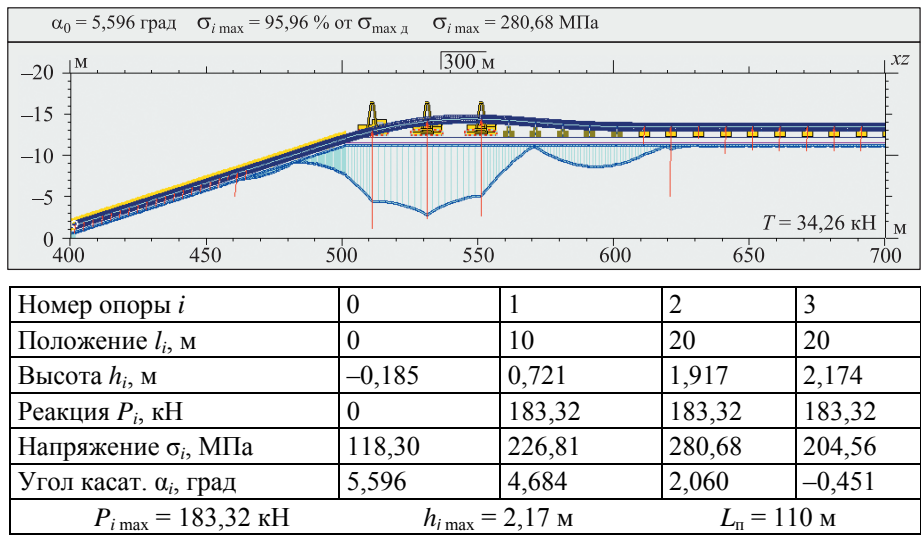


Рис. 35. Трубопровод при отходе назад опоры D (см. рис. 25, в) и при минимальности усилий

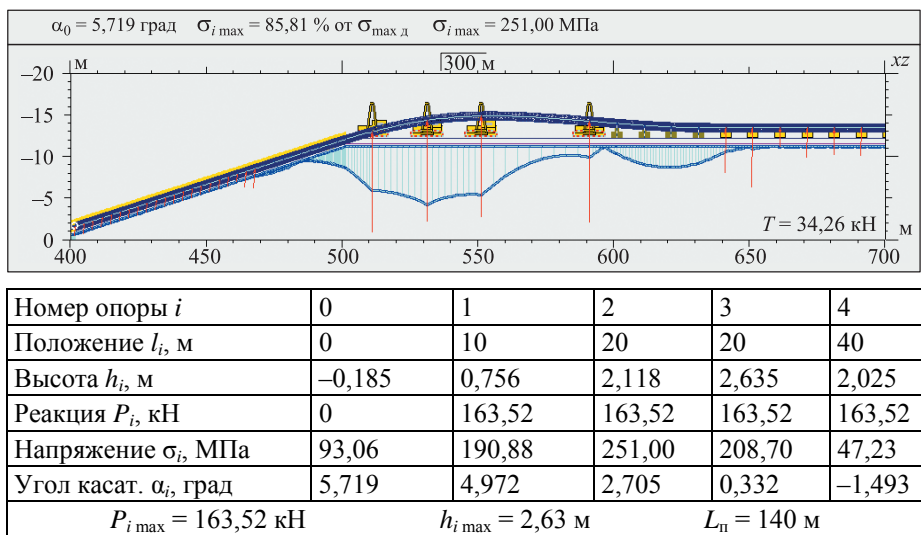
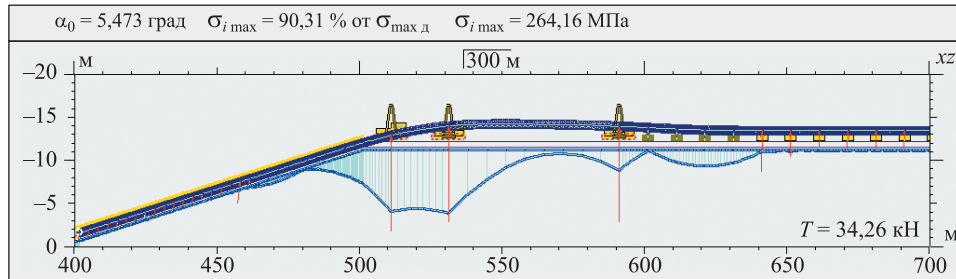
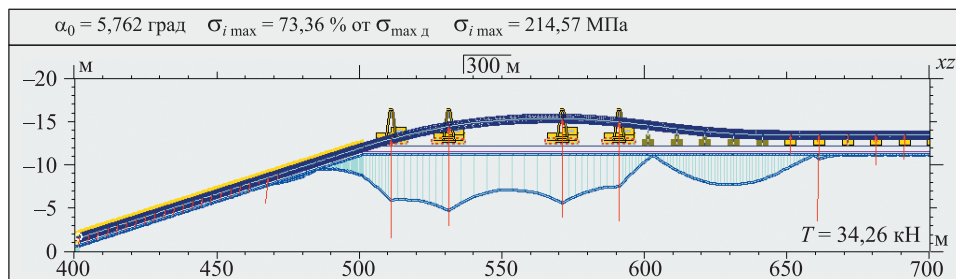


Рис. 36. Трубопровод при подключении опоры D (см. рис. 25, г) и при минимальности усилий



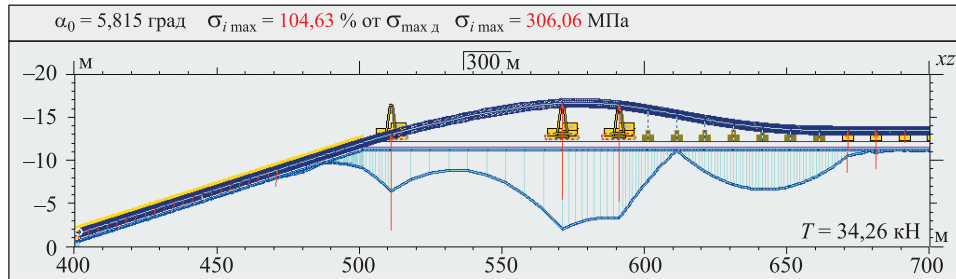
Номер опоры i	0	1	2	3
Положение l_i , м	0	10	20	60
Высота h_i , м	-0,185	0,687	1,759	1,736
Реакция P_i , кН	0	228,61	228,61	228,61
Напряжение σ_i , МПа	140,88	258,00	264,16	83,15
Угол касат. α_i , град	5,473	4,415	1,708	-0,767
$P_{i \max} = 228,61$ кН		$h_{i \max} = 1,76$ м		$L_{\text{п}} = 140$ м

Рис. 37. Трубопровод при отходе назад опоры С (см. рис. 25, е) и при минимальности усилий



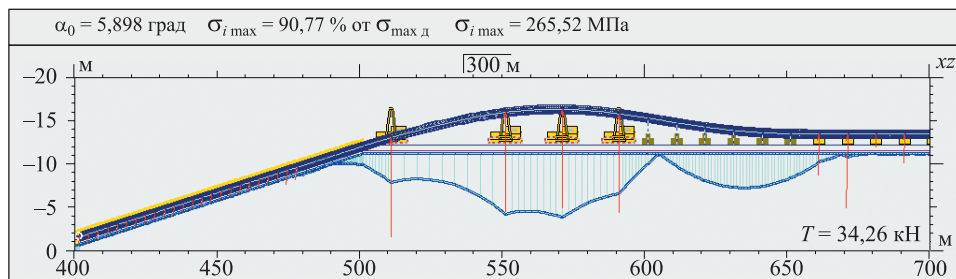
Номер опоры i	0	1	2	3	4
Положение l_i , м	0	10	20	40	20
Высота h_i , м	-0,185	0,769	2,209	3,140	2,731
Реакция P_i , кН	0	172,67	172,67	172,67	172,67
Напряжение σ_i , МПа	83,35	176,75	214,57	188,21	123,59
Угол касат. α_i , град	5,762	5,080	3,088	-0,329	-1,898
$P_{i \max} = 172,67$ кН		$h_{i \max} = 3,14$ м		$L_{\text{п}} = 150$ м	

Рис. 38. Трубопровод при подключении опоры С (см. рис. 25, д) и при минимальности усилий



Номер опоры i	0	1	2	3
Положение l_i , м	0	10	60	20
Высота h_i , м	-0,185	0,785	4,400	4,169
Реакция P_i , кН	0	246,07	246,07	246,07
Напряжение σ_i , МПа	70,72	157,92	306,06	265,03
Угол касат. α_i , град	5,815	5,218	0,866	-2,116
$P_{i \max} = 246,07$ кН		$h_{i \max} = 4,40$ м	$L_{п} = 170$ м	

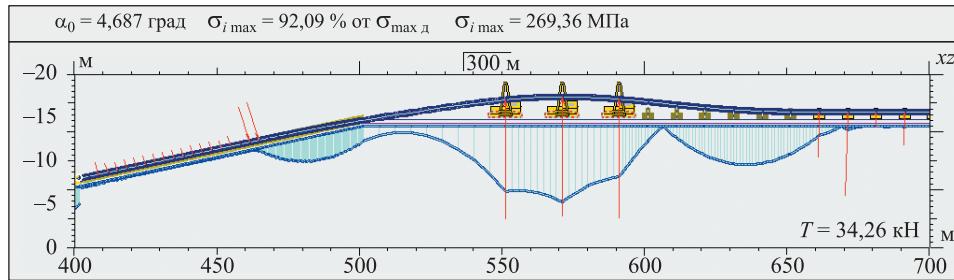
Рис. 39. Трубопровод при отходе назад опоры В (см. рис. 25, ж) и при минимальности усилий



Номер опоры i	0	1	2	3	4
Положение l_i , м	0	10	40	20	20
Высота h_i , м	-0,185	0,813	3,723	4,093	3,571
Реакция P_i , кН	0	171,94	171,94	171,94	171,94
Напряжение σ_i , МПа	47,62	121,68	250,62	265,52	165,91
Угол касат. α_i , град	5,898	5,462	2,388	-0,294	-2,514
$P_{i \max} = 171,94$ кН		$h_{i \max} = 4,09$ м	$L_{п} = 160$ м		

Рис. 40. Трубопровод при подключении опоры В (см. рис. 25, з) и при минимальности усилий

из рассмотрения при проведении работ, возможно, с принятием дополнительных мер для снижения напряжений. Последствия отказа одной из опор во время поочередного движения в исходное положение не рассматривались ввиду недопустимости этого события из-за создания повышенных напряжений.



Номер опоры i	0	1	2	3
Положение l_i , м	0	50	20	20
Высота h_i , м	-0,185	3,374	3,864	3,456
Реакция P_i , кН	0	181,58	181,58	181,58
Напряжение σ_i , МПа	54,63	230,88	269,36	179,53
Угол касат. α_i , град	4,687	2,665	0,071	-2,245
$P_{i \max} = 181,58$ кН		$h_{i \max} = 3,86$ м		$L_{\pi} = 160$ м

Рис. 42. Трубопровод при отходе назад опоры А (см. рис. 25, и) при минимальности усилий, скважина заполнена буровым раствором

Заключение. В представленной работе рассмотрены вопросы оптимизации применения опор наземной части трубопровода в процессе его протаскивания по скважине при строительстве подводного перехода способом наклонно-направленного бурения. В части 1 работы путем моделирования трубопровода проведена оценка влияния различных факторов на его состояние при неподвижных опорах в пределах переходного участка. В части 2 исследовано применение опор, движущихся циклическим образом как к скважине, так и от нее. При перемещении опор выполняются условия минимальности либо напряжений в трубопроводе, либо действующих усилий, а также отсутствия контактных нагрузок за входом трубопровода в скважину. Полученное решение может служить дополнением к нормативной документации по строительству подводных переходов, позволяющим унифицировать подходы к применению опор и снизить риск повреждения трубопровода или изоляционного покрытия при протаскивании.

Статья поступила в редакцию 19.05.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Овчинников Н.Т. Оптимальное применение опор при вводе трубопровода в скважину подводного перехода. Часть 2. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 1. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-1-2241>

Овчинников Николай Тихонович — канд. техн. наук, научный консультант ООО «ГеоСплит». Область научных интересов: моделирование протяженных трубных систем в технологических процессах нефтегазовой отрасли.
e-mail: ntorvs@rambler.ru

Optimal use of supports in interposing a pipeline into the submerged crossing well. Part 2

© N.T. Ovchinnikov

GeoSplit LLC, Moscow, 121205, Russia

The paper considers the problem of supports optimal arrangement in pulling a pipeline through the well during construction of the submerged crossing by the directional drilling method. Part 1 of this work presented results of using the pipeline rod model with positioning the transition section on the fixed supports with the variable lift height. Part 2 simulates the use of a group of the movable supports. Initially, the group working stroke is carried out accompanied by the supports positioning towards the well with a decrease in the pipeline height. After a stop in the final position, the group is being restructured taking the initial position for the next motion cycle. When the supports are moved, optimality conditions are met in the form of the missing contact load behind the well inlet and minimum stresses in the transition section, or the minimum supports reaction. The supports are brought to their initial state by taking the first support behind the last support, or by moving each of the supports in turn to the required position. The presented solution allows pulling through at the technologically determined minimum impact of the mounting loads on the pipeline.

Keywords: pipeline, rod, submerged crossing, well, pulling, support, stresses, bend, pipe layer, directional drilling

REFERENCES

Ovchinnikov N.T. Optimalnoye primeneniye opor pri vvode truboprovoda v skvazhinu podvodnogo perekhoda. Chast 1 [Optimal use of supports in interposing a pipeline into the submerged crossing well. Part 1]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2022, iss. 12.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-12-2232>

Ovchinnikov N.T., Cand. Sc. (Eng.), Scientific Consultant, GeoSplit LLC. Research interest: simulation of extended pipe systems in technological processes of the oil and gas industry. e-mail: ntorvs@rambler.ru