

**Received:** 18.06.2024

**Revised:** 06.08.2024


**Accepted:** 16.08.2024


**DOI:** 10.17804/2410-9908.2024.4.102-117

## MAKING A PARAMETER MAP FOR THE INELASTIC CYCLIC DEFORMATION OF COILED TUBING PIPES BY MEANS OF A DIGITAL MODEL OF TEST EQUIPMENT

V. B. Poroshin<sup>a,\*</sup> and A. N. Ufimtsev<sup>b</sup>

*South Ural State University, 76 Lenina Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia*

<sup>a</sup>  poroshin2816@mail.ru;

<sup>b</sup>  alehsa2@mail.ru

\*Corresponding author. Email: poroshin2816@mail.ru

Address for correspondence: Sverdlovskiy prospekt, 28a, apart. 139, Chelyabinsk, 454008 Russia

Tel.: +7 (951) 794-0439

The accelerated resource testing technique is applied to the digital simulation of bench tests of coiled tubing pipes. Finite element models of the stand and a tube specimen are formed in the Ansys Mechanical package. By calculating the kinetics of the stress-strain state of the specimen, inelastic hysteresis loops for a stabilized cycle are obtained for a number of combinations of operating loads, namely internal pressure, pipeline weight, and the size of the guide device. Status maps are constructed therefrom, relating the parameters of inelastic deformation (alternating plastic flow, ratcheting of strain induced by alternating plastic flow) to loads. The use of the status maps makes possible reasonable planning of real experimental research programs to simulate the required form of coiled tubing failure under operating conditions, and this significantly reduces time, labor, and material costs.

**Keywords:** coiled tubing, digital model of the test bench and the specimen, calculation of the kinetics of alternating inelastic deformation, Ansys Mechanical FEM package, ratcheting of plastic strain, alternating plastic flow, parameter map of inelastic cyclic deformation

### References

1. Kuznetsov, N.D. and Tseytlin, V.I. *Ekvivalentnyye ispytaniya gazoturbinnnykh dvigateley* [Equivalent Tests of Gas Turbine Engines]. Mashinostroenie Publ., Moscow, 1976, 214 p. (In Russian).
2. Gokhfeld, D.A., Getsov, L.B., Kononov, K.M., Kulchikhin, E.T., Rebyakov, Yu.N., Sadakov, O.S., Timashev, S.A., and Chepuriskiy, V.N. *Mekhanicheskie svoystva staley i splavov pri nestatsionarnom nagruzhении*. Spravochnik [Mechanical Properties of Steels and Alloys under Non-Stationary Loading: Handbook]. UrO RAN Publ., Ekaterinburg, 1996, 408 p. (In Russian).
3. Qian-Bei, Y., Guohao, S., Gang, W., Jubao, L., Ming, Y., and Qiang, Z. Experimental study on the influence of bending and straightening cycles for non-destructive and destructive coiled tubing. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 123, 105218. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105218.
4. Poroshin, V.B., Buksbaum, V.B., and Druzhinin, P.S. Technique for forecasting the operating life of coil tubing on the basis of laboratory and bench tests. *Vestn. Yuzhno-Ural. Gos. Un-ta. Ser. Matem. Mekh. Fiz.*, 2014, 6 (3), 72–77. (In Russian).
5. Ilyinykh, V.N. and Syzrantsev, V.N. Construction of a mathematical model for describing the data of low-cycle fatigue tests. In: *Fundamentalnaya nauka i tekhnologii – perspektivnyye razrabotki: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [International Scientific-

Practical Conference “Fundamental Science and Technologies – Advanced Development”, Moscow, May 22–23, 2013: Proceedings]. Moscow, 2013, pp. 224–226. (In Russian).

6. Poroshin, V.B. and Ufimtsev, A.N. The test bench digital model and FEM-analysis for the kinetics of a stress-strain state of coiled tubing specimens. In: *Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem “Tsifrovaya industriya: sostoyaniye i perspektivy razvitiya TSISP’2023”* [2023 Global Smart Industry Conference, Chelyabinsk, November 21–23, 2023: Collection of Scientific Papers]. Chelyabinsk, YuUrGU Publ., 2024, pp. 377–386. (In Russian). Available at: <http://omega.sp.susu.ru/glosic2023/articles/039.pdf>

7. [http://help/ans\\_elem/Hlp\\_E\\_SHELL181.html](http://help/ans_elem/Hlp_E_SHELL181.html)

8. Ramberg, W. and Osgood, W.R. Description of stress–strain curves by three parameters, NACA–TN–902, 1943, 32 p.

Подана в журнал: 18.06.2024  
УДК 621.774.3:620.178  
DOI: 10.17804/2410-9908.2024.4.102-117

## ПОСТРОЕНИЕ КАРТЫ ПАРАМЕТРОВ НЕУПРУГОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОЛТЮБИНГОВЫХ ТРУБ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В. Б. Порошин<sup>а, \*</sup>, А. Н. Уфимцев<sup>б</sup>

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет»,  
просп. Ленина, 76, Челябинск, 454080, Россия

<sup>а</sup> ✉ poroshin2816@mail.ru;

<sup>б</sup> ✉ alehsa2@mail.ru

\*Ответственный автор. Электронная почта: poroshin2816@mail.ru  
Адрес для переписки: Свердловский просп., 28а, кв. 139, Челябинск, 454008, Россия  
Телефон: +7 (951) 794-04-39

Методика ускоренных ресурсных испытаний применена к цифровому моделированию стендовых испытаний колтюбинговых труб. В пакете Ansys Mechanical сформированы конечно-элементные модели стенда и образца трубы. Расчетом кинетики напряженно-деформированного состояния образца получены петли неупругого гистерезиса для стабилизированного цикла при ряде сочетаний эксплуатационных нагрузок: внутреннего давления, веса трубной плети, размера направляющего устройства. На этой основе построены карты состояний, связывающие параметры неупругого деформирования (знакопеременное пластическое течение, одностороннее накопление деформации на фоне знакопеременного пластического течения) с нагрузками. Использование карт состояний позволяет обоснованно спланировать программы реальных экспериментальных исследований для моделирования требуемого вида выхода колтюбинга из строя в условиях эксплуатации, что существенно сокращает временные, трудовые и материальные затраты.

**Ключевые слова:** колтюбинг, цифровая модель испытательного стенда и образца, расчет кинетики повторно-переменного неупругого деформирования, пакет МКЭ Ansys Mechanical, одностороннее накопление пластической деформации, знакопеременное пластическое течение, карта параметров неупругого циклического деформирования

### 1. Введение

Термин «колтюбинг» (*coiled tubing*) относится как к одной из прогрессивных технологий современного нефтегазового промысла, так и к ее основному объекту – длинной гибкой трубе, разматываемой с барабана и опускаемой в скважину на глубину до 1,5...2 км и более.

В процессе эксплуатации трубная плеть испытывает интенсивное воздействие повторно-переменного циклического изгиба, внутреннего давления и растяжения весом трубы. Это обстоятельство определяет весьма ограниченный ресурс объекта (80...300 типовых спуско-подъемных операций, в зависимости от марки стали, сочетания нагрузок и их интенсивности). Те же факторы влияют и на характер деформирования в отдельных областях трубы: знакопеременное пластическое течение или одностороннее накопление деформации на фоне повторно-переменного неупругого деформирования. Обусловленное этими процессами образование трещин малоциклового усталости грозит обрывом трубной плети, что неизбежно повлечет многомиллионные потери, определяемые как стоимостью самой трубы, так и выводом из эксплуатации заглушенной скважины.

Одним из путей предотвращения подобных негативных последствий являются эквивалентные ресурсные испытания или испытания на подтверждение ресурса, методика организации и проведения которых детально отработана в практике проектирования и доводки авиационных ГТД [1]. Такие испытания – вначале отдельных узлов, а затем изделия в целом – проводятся на специальных стендах.

Аналогично на специализированных стендах испытывают образцы, вырезанные из трубной плети, вновь изготовленной или с наработкой. Такие стенды уникальны, разнообразны по конструкции и возможностям. Они существуют лишь в отдельных организациях, например в Клаустальском техническом университете (Германия), университете города Талса (США), Тюменском государственном нефтегазовом университете, предприятии ОАО «Уралтрубмаш» (г. Челябинск). Вместе с тем надо признать, что такие испытания трудоемки, продолжительны и дороги. Существенно сократить их объем за счет выбора представительных программ нагружения, воспроизводящих предельные состояния колонны гибких труб (КГТ), наблюдаемые в условиях эксплуатации, позволили бы адекватные цифровые модели стенда и образца.

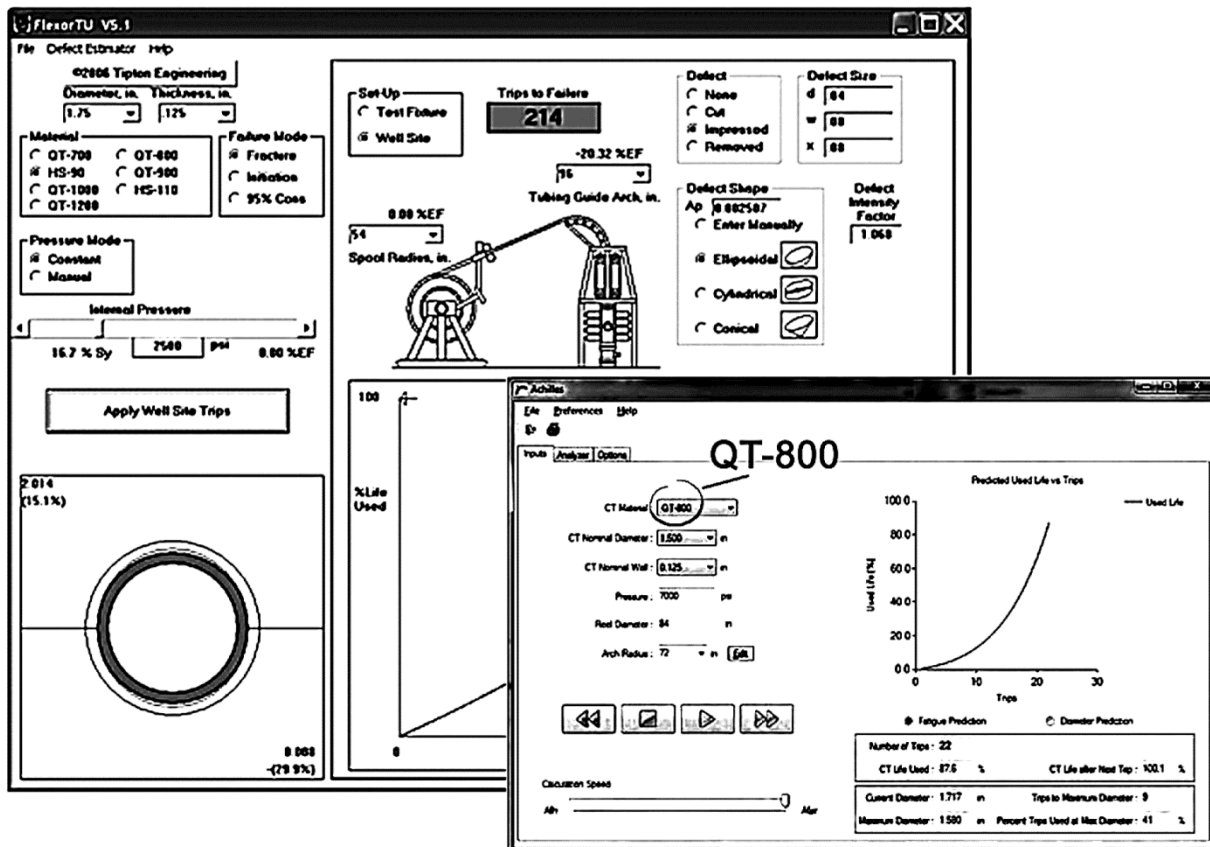


Рис. 1. Окна задания исходных данных в одном из зарубежных программных комплексов

Анализ доступных литературных источников показал, что в этой области практика, к сожалению, значительно опережает теорию, так как не существует не только соответствующих отраслевых нормативных документов, но и единой методики оценки остаточного ресурса и долговечности КГТ. Отечественные разработки (ведущиеся, в частности, в Тюменском нефтегазовом государственном университете) отличаются недостаточной, на наш взгляд, адекватностью используемых математических моделей деформационных и прочностных свойств металлических материалов в условиях повторно-переменного нагружения. Коммерческие программные комплексы (как правило, зарубежные – CTLife, FACT, Cerberus и другие), хоть и обещают решение многих проблем, носят закрытый характер, поэтому ана-

лиз и оценка используемых в них подходов затруднительны. В показанном на рис. 1 примере (окно Inputs модуля Achilles) свойства материала определяются маркой стали, механические характеристики которой «защиты» в соответствующей базе данных пакета. Следовательно, если нужная марка стали, скажем, отечественного производства, в библиотеке отсутствует, такой пакет оказывается бесполезен. К тому же в большинстве известных нам зарубежных программных продуктов в качестве механических характеристик материала используются показатели прочности и деформационных свойств, отвечающие *монотонному однократному* статическому нагружению, что не соответствует характеру деформирования материала реального объекта.

В ряде работ результаты испытания образцов труб сопоставляются с данными анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) и оценкой долговечности, полученными в аналитическом виде или расчетным путем (обычно методом конечных элементов) [3–5]. Логичным развитием такого подхода представляется моделирование всего комплекса в целом: образца, испытательного оборудования и самого процесса испытания (в этом случае практически отсутствуют ограничения на конструкцию стенда, виды нагрузок и их величину), однако число такого рода публикаций крайне невелико.

Таким образом, целью предпринятого исследования, представляющего развитие работы [6], является разработка цифровой модели испытательного комплекса, анализ процесса неупругого деформирования материала с использованием адекватной математической модели деформационных свойств инкрементального типа [2] и построение карты состояний, связывающей параметры неупругого деформирования (знакопеременного пластического течения, одностороннего накопления деформации на фоне знакопеременного пластического течения) с нагрузками, что позволит существенно сократить временные, трудовые и материальные затраты при выборе режимов реальных испытаний, имитирующих актуальные случаи выхода колтюбинга из строя в условиях эксплуатации.

## 2. Деформационные характеристики материала и методика моделирования

В лаборатории кафедры «Техническая механика» Южно-Уральского государственного университета были проведены испытания плоских образцов из трубной стали А606-4 (США) при однократном монотонном и блочном циклическом нагружении с увеличивающимся от блока к блоку размахом деформации. В каждом блоке испытания велись в режиме жесткого симметричного по деформациям нагружения до стабилизации процесса деформирования. Обработкой результатов получены диаграмма деформирования  $\sigma$ – $p$  при начальном нагружении (для краткости – статическая кривая), кривая циклического деформирования в осях «изменение напряжения с момента реверса скорости деформации ( $\sigma_*$ ) – изменение пластической деформации ( $p_*$ )» и циклическая кривая «амплитуда напряжения  $\sigma_a$  – амплитуда пластической деформации  $p_a$ » ( $p \equiv \varepsilon_p$  – неупругая составляющая полной деформации), рис. 2. Кривая циклического деформирования представляет траекторию движения точки состояния в пространстве «напряжение – деформация» и описывает, таким образом, петлю неупругого гистерезиса. Циклическая кривая в этих условиях отражает изотропное упрочнение материала в процессе циклического деформирования. Ее вид зависит от материала (т. е. химического состава), начального состояния объекта (термообработки, наклепа, наличия остаточных напряжений и т. п.), коэффициента асимметрии цикла и, как видно на графике, от амплитуды пластической деформации. Наибольшее различие, особенно при значительных величинах пластической деформации, наблюдается между начальной кривой и диаграммой циклического деформирования (см. рис. 2). Таким образом, распространенная в расчетах практика – использование характеристик материала, снятых с диаграммы при однократном монотонном нагружении – может привести к существенным погрешностям. В условиях «мягкого» нагружения – к ошибке «в запас» по неупругой деформации, что может повлечь

неоправданно заниженную оценку долговечности и снятие с эксплуатации вполне работоспособного изделия. При «жестком» нагружении – к ошибке «не в запас» по действующим напряжениям.

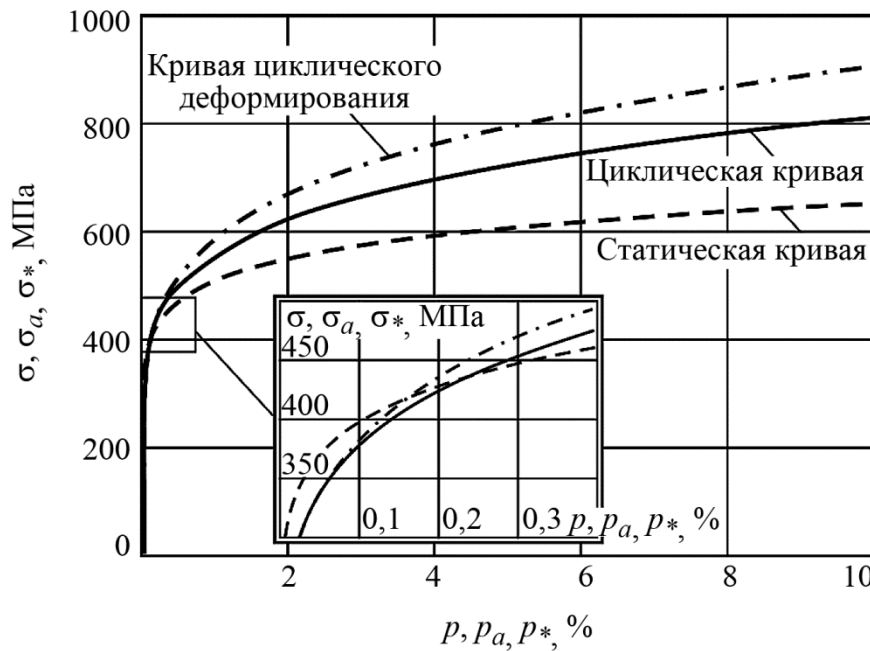


Рис. 2. Сопоставление кривой циклического деформирования, циклической кривой и диаграммы деформирования при однократном нагружении трубной стали А606-4 (неопубликованные данные Ю. Н. Ребякова)

Забегая вперед, заметим, что в результате анализа изменения компонент напряженно-го состояния в девиаторном пространстве в течение цикла установлено, что нагружение образца трубы оказалось близко к пропорциональному. Это обстоятельство позволяет считать, что характеристики деформационных свойств стали, полученные экспериментально в условиях линейного напряженного состояния, могут быть вполне корректно использованы при расчете кинетики НДС при действии всех эксплуатационных нагрузок.

В течение одного типового технологического цикла (спуско-подъемной операции) отдельные области трубы несколько раз подвергаются неупругому знакопеременному деформированию: во время спуска – при размотке трубы с барабана, изгибе на дуге направляющего устройства, выпрямлении в инжекторе и далее, при погружении в скважину и подаче давления; во время подъема – при прохождении через направляющую дугу, выпрямлении после направляющей и, наконец, при намотке на барабан. Отмечается, что внутреннее давление совместно с переменными изгибающими нагрузками приводит к овализации трубы. В процессе эксплуатации на трубу действует также осевая растягивающая нагрузка от собственного веса. Это воздействие необходимо учитывать как при построении модели стенда, так и при моделировании испытаний образца, поскольку оно определяет квазистатическое повреждение, связанное с односторонним накоплением деформации, влияющее на долговечность и надежность колтюбинга. История изменения деформации в одной из точек сечения трубы для одного технологического цикла показана на рис. 3.

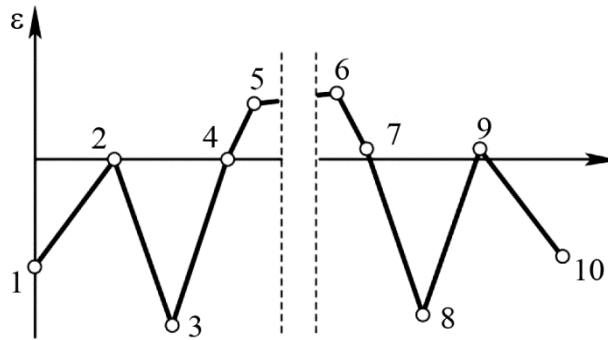


Рис. 3. Схема деформирования материала в опасной точке опасного сечения трубы в типичном технологическом цикле: 1–2 – размотка с барабана; 2–3 – изгиб на направляющей; 3–4 – выпрямление после схода с направляющей; 4–5 – приложение эксплуатационных нагрузок; 5–6 – технологический процесс; 6–7 – снятие нагрузок; 7–8 – изгиб на направляющей; 8–9 – выпрямление после направляющей; 9–10 – намотка на барабан

Спроектированной установкой (рис. 4) осуществляется нагружение кинематического типа перемещением оправок 2 с помощью гидроцилиндров 4 с прямым и обратным ходом штока в сочетании с силовым нагружением путем растяжения образца с помощью гидроцилиндра 3, имитирующего вес трубной плети. В испытании может быть реализован симметричный знакопеременный изгиб образцов длиной 2 м вокруг оправок радиусом 1200 мм. Цикл нагружения включает растяжение образца трубы с помощью гидроцилиндра, имитирующего вес плети КГТ, изгиб изначально прямой трубы, определяемый радиусом кривизны оправок, распрямление, изгиб в противоположном направлении и выпрямление в исходное состояние. Установка допускает замену оправок на другие, с иными радиусами кривизны, например в случае использования барабана другого диаметра, что позволяет изменять параметры деформирования. Таким образом, возможна реализация несимметричного повторно-переменного изгиба. Конструкция стенда, наряду со знакопеременным упруго-пластическим изгибом, предусматривает также нагружение образца внутренним давлением, что приведет к появлению дополнительных растягивающих окружных и осевых напряжений.

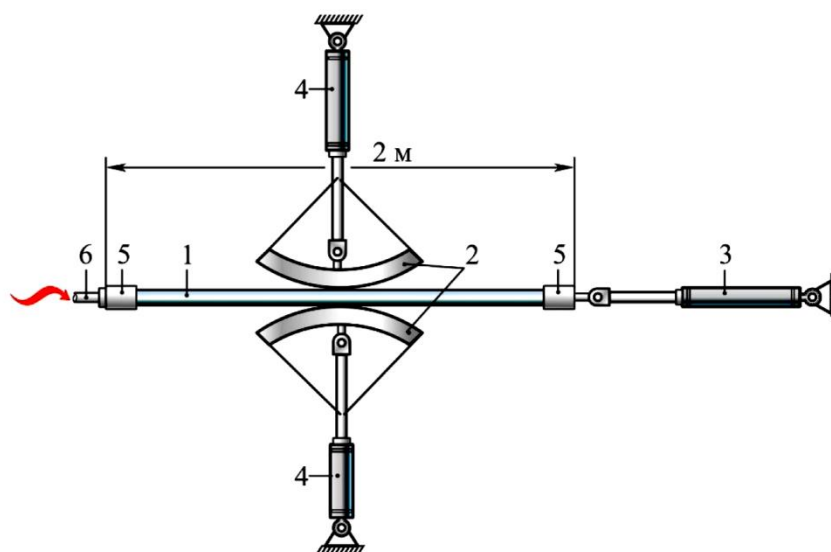


Рис. 4. Схема испытательного стенда: 1 – образец; 2 – жесткие оправки; 3 – гидроцилиндр, имитирующий вес трубной плети; 4 – гидроцилиндр с прямым и обратным ходом штока; 5 – герметичный захват; 6 – штуцер для подачи рабочей жидкости

В ходе численного моделирования испытания в условиях знакопеременного изгиба образца в пакете Ansys APDL был разработан программный модуль, предназначенный для расчета неупругого деформирования фрагмента гибкой трубы с учетом реальных свойств материала и геометрии объекта. На рис. 5 представлена конечно-элементная модель, включающая абсолютно жесткие оправки и фрагмент трубы.

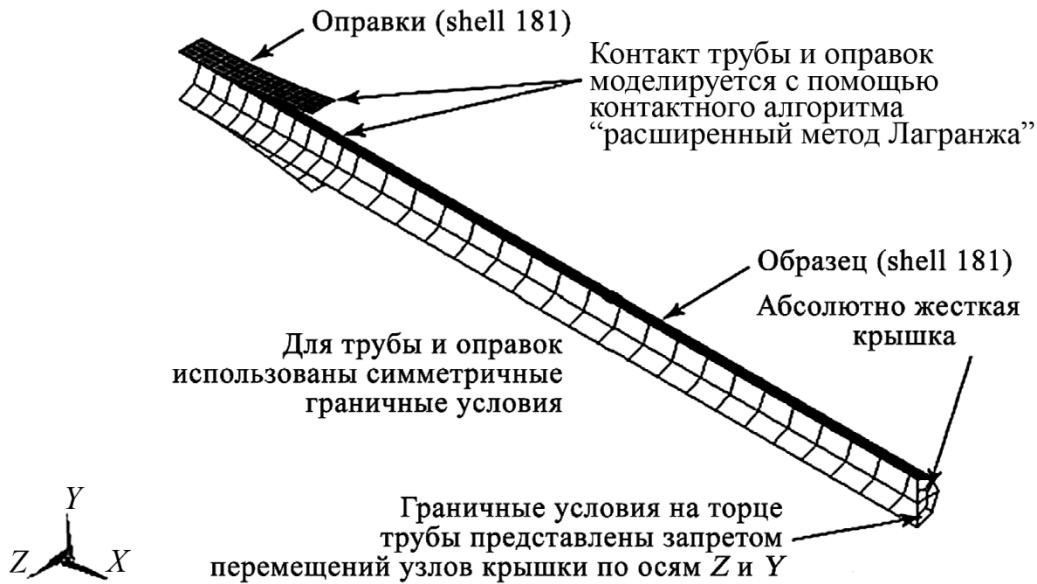


Рис. 5. МКЭ-модель образца трубы и оправок

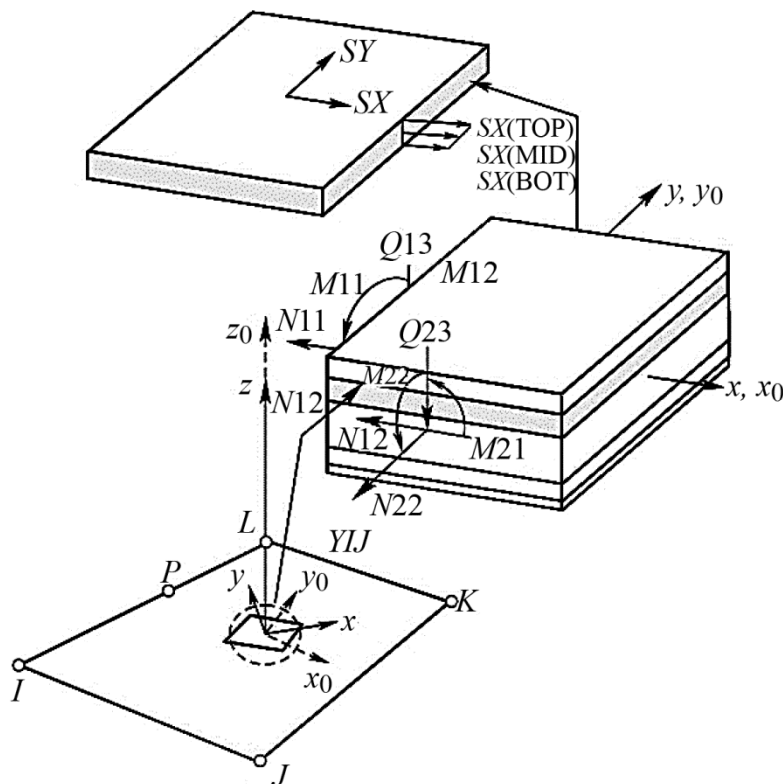


Рис. 6. Конфигурация конечного элемента Shell 181, расположение его узлов, положение координатных осей и внутренние силовые факторы в элементе, учитываемые в расчете [7]



Моделью испытательной установки воспроизводятся радиусы кривизны оправок и условия закрепления трубы, предусмотрена возможность приложения внутреннего давления, а также растяжение образца осевой силой. Оправки станда для сокращения времени расчета моделируются плоскими элементами Shell 181 с меньшим, чем у solid-элементов, числом узлов; их материал полагается абсолютно жестким в соответствии с естественным допущением о значительно большей жесткости элементов станда по сравнению с жесткостью испытываемого образца.

Фрагмент гибкой трубы также моделировали с помощью элементов Shell 181 (рис. 6). Этот элемент пригоден для воспроизведения оболочек с заданной толщиной стенки и позволяет вести расчеты за пределами упругости, в том числе с учетом больших перемещений. Поскольку нагружение объекта изгибом носит кинематический характер (реализуется так называемый жесткий цикл), то гидроцилиндрам оправок испытательной установки задается синхронное перемещение по оси  $Y$ . Труба при этом изгибается и деформируется до полного контакта с оправками. Закрепление образца моделировали запретом линейных перемещений узлов на торце трубы вдоль оси  $Z$  и  $Y$  и запретом поворотов тех же узлов относительно осей  $X$  и  $Y$ . Осевая сила, определяющая растяжение образца, приложена к торцу трубы. Закрепление оправок моделировали запретом перемещений узлов по осям  $Z$  и  $X$  и поворотов тех же узлов относительно осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

С учетом симметрии задачи, для снижения трудоемкости расчетов моделировалась лишь четверть конструкции. В граничных условиях также учитывалась симметрия системы. При решении задачи использованы контактные алгоритмы, позволяющие с помощью специальных элементов описать контакт поверхности трубы и оправок. Рисунок 7 иллюстрирует отдельные этапы изгиба трубы на оправках.

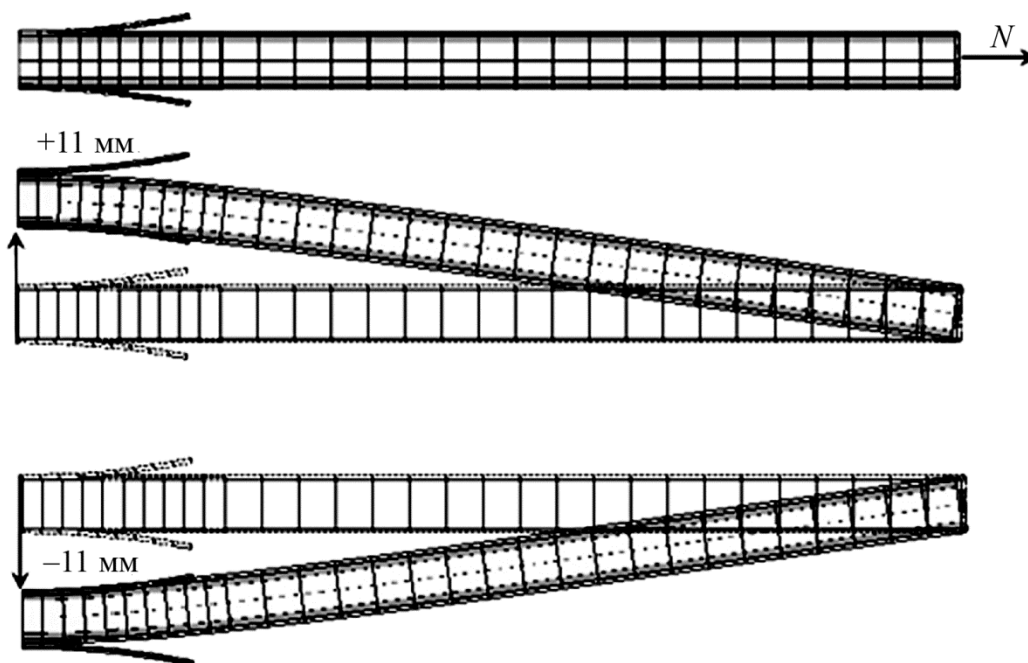


Рис. 7. Вид изгибаемого образца на отдельных этапах расчета

### 3. Результаты и обсуждение

Анализ кинетики напряженно-деформированного состояния образца трубы производили на основе результатов поциклового расчета до стабилизации процесса неупругого деформирования в условиях циклического знакопеременного изгиба, нагружения внутренним рабочим давлением 20 МПа и растягивающей силой разной величины. В ходе расчетов находили наиболее

нагруженное сечение объекта, а в нем – наиболее опасную точку, в которой реализуются наибольший размах неупругой деформации и наибольшая односторонне накопленная неупругая деформация. Считается, что первый фактор – размах неупругой деформации – определяет так называемое усталостное повреждение, а второй – его квазистатическую составляющую. В выявленных таким образом опасных точках по данным расчета в каждом шаге по времени были построены петли неупругого гистерезиса, соответствующие стабильному циклу.

В связи с этим возникает вопрос: на основе какой из трех, вернее двух, диаграмм деформирования следует производить расчет? Наиболее корректные результаты получаются с использованием кривой циклического деформирования (см. рис. 2) при условии, что она соответствует размаху деформации (напряжения), реализующегося в конструкции. Разумеется, эта величина заранее неизвестна, поэтому приемлемым компромиссом представляется циклическая кривая, которую получают при ряде значений размаха деформации в стабильном цикле, а при выполнении расчетов часто аппроксимируют по Рамбергу – Осгуду [8].

Установлено, что в опасных точках трубчатого образца компоненты НДС изменяются от цикла к циклу как по величине, так и по знаку. При кинематическом циклическом нагружении оправками определенного радиуса в элементах объема наиболее нагруженного сечения в отдельные моменты времени реализуется как растягивающая, так и сжимающая деформация.

Качественное влияние на поведение конструкции оказывает комбинация нагрузок, в частности циклически изменяющийся изгибающий момент с постоянной растягивающей силой. Осевое удлинение колонны гибких насосно-компрессорных труб может значительно снизить их ресурс (до сотен и даже десятков циклов, что соответствует области малоциклового и ультрамалоциклового усталости), особенно при наличии так называемой циклической ползучести, вызывающей продолжающееся от цикла к циклу изменение границы зоны неупругого деформирования. В условиях только лишь знакопеременного изгиба по абсолютно жестким оправкам заданного радиуса в опасной точке реализуется кинематический тип нагружения, приводящий к знакопеременному течению материала. В результате стабилизации полей остаточных напряжений цикл становится симметричным как по напряжениям, так и по деформациям (рис. 8).

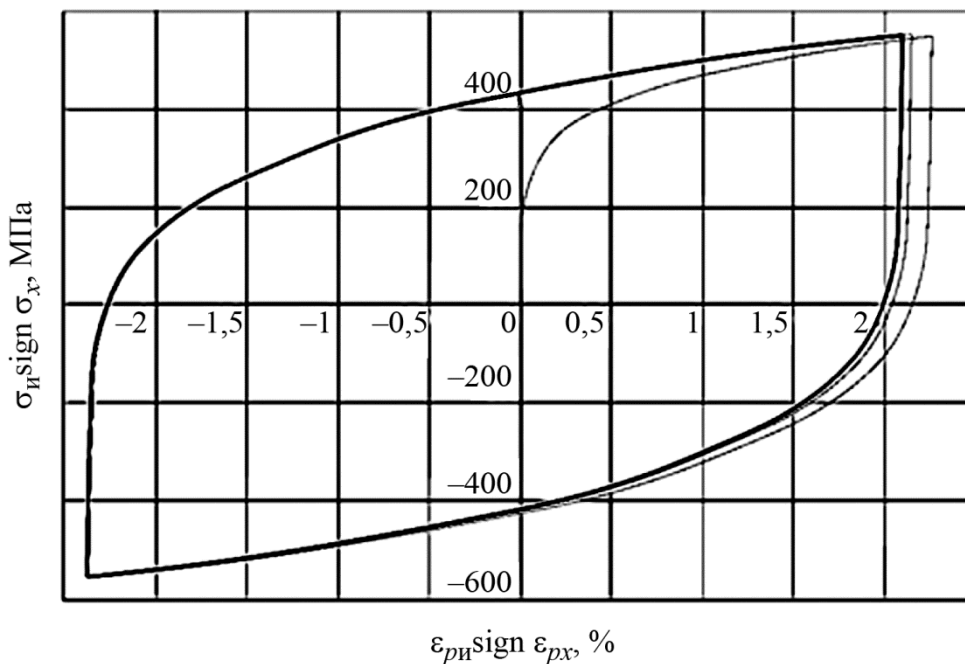


Рис. 8. Результаты расчета кинетики неупругого деформирования до стабилизации цикла, соответствующего знакопеременному пластическому течению (знакопеременный изгиб по оправкам заданного радиуса в отсутствие осевой силы и внутреннего давления)

На рис. 9–12 представлены петли неупругого гистерезиса, иллюстрирующие кинетику НДС в наиболее нагруженной точке (для наглядности петли построены в осях «интенсивность напряжений  $\sigma_{и\text{sign}}$  – интенсивность неупругой деформации  $\varepsilon_{рн\text{sign}}$ », которым присвоен знак наибольшей по модулю компоненты), при совместном воздействии на трубчатый образец внутреннего рабочего давления и осевой растягивающей силы.

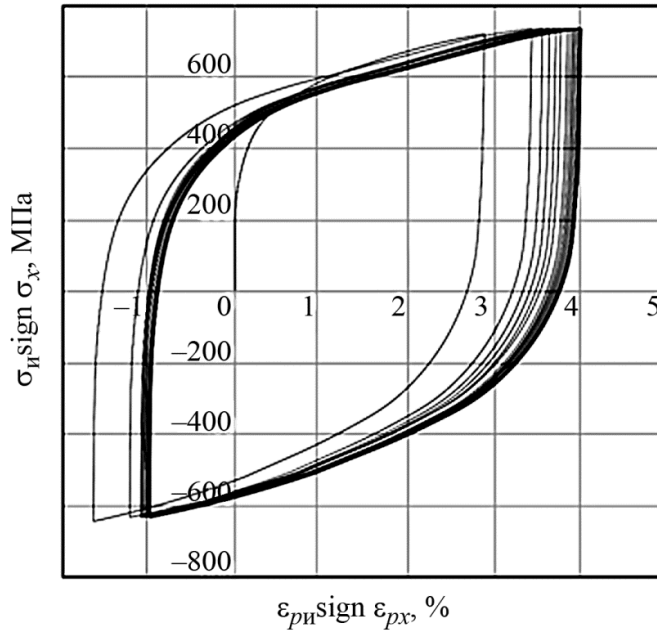


Рис. 9. Результаты расчета кинетики неупругого деформирования до стабилизации цикла, соответствующего одностороннему накоплению деформации на фоне знакопеременного пластического течения (знакопеременный изгиб на оправках, растяжение осевой силой, равной 37,5 кН, от собственного веса трубы длиной 750 м, рабочее давление 20 МПа)

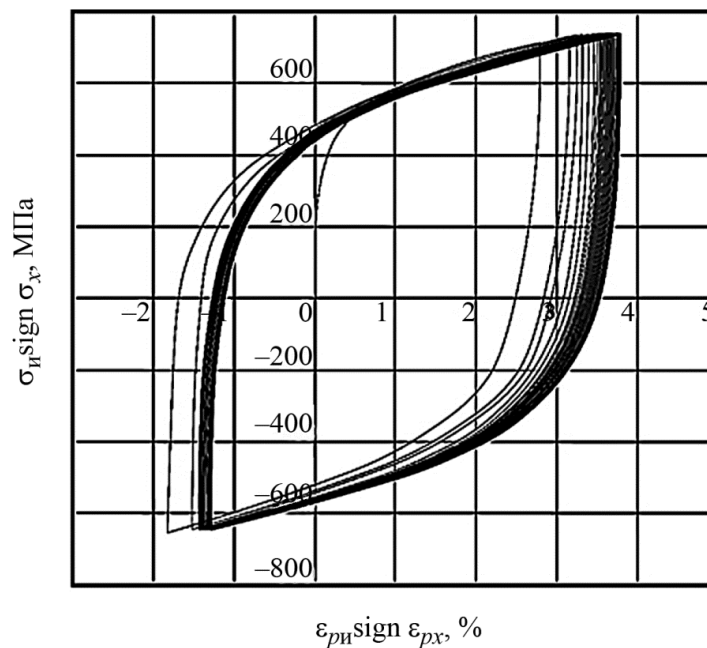


Рис. 10. Результаты расчета кинетики неупругого деформирования до стабилизации цикла, соответствующего одностороннему накоплению деформации на фоне знакопеременного пластического течения (знакопеременный изгиб на оправках, растяжение осевой силой 50 кН от собственного веса трубы длиной 1000 м, давление 20 МПа)

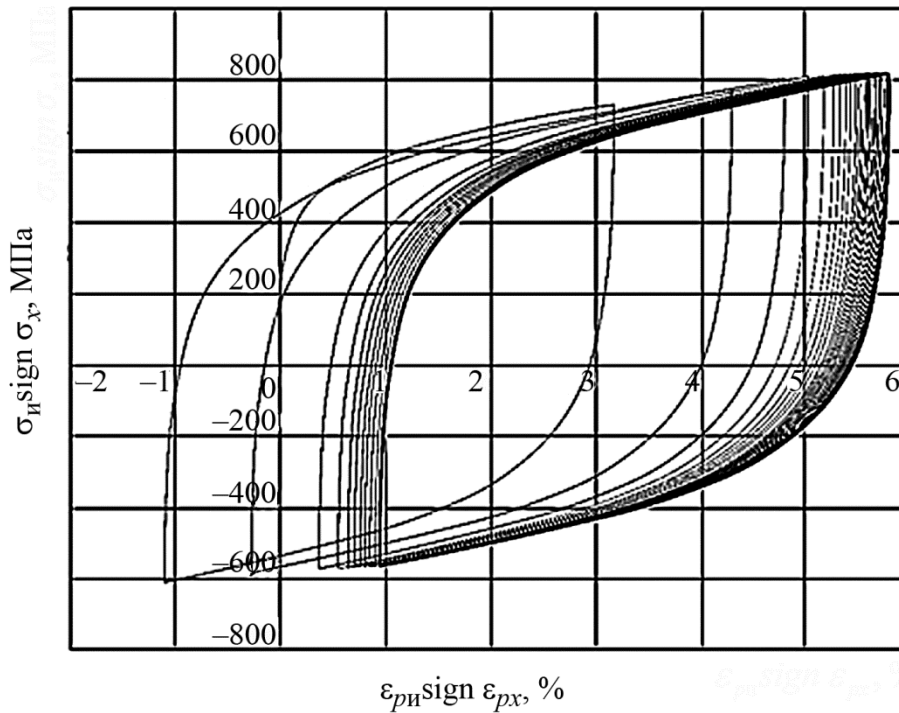


Рис. 11. Результаты расчета кинетики неупругого деформирования до стабилизации цикла, соответствующего одностороннему накоплению деформации на фоне знакопеременного пластического течения (знакопеременный изгиб на оправках, растяжение осевой силой, равной 100 кН, от собственного веса трубы длиной 2000 м, давление 20 МПа)

Как видно, приложение последней приводит к сдвигу петли в процессе стабилизации цикла с изменением компонент деформации и, соответственно, размаха интенсивности неупругой деформации. Одностороннее накопление деформации постепенно (после 20–25 циклов нагружения) прекращается, и петли гистерезиса замыкаются. Как видно, центр диаграммы неупругого деформирования оказывается смещенным в область растягивающих деформаций. Это означает, что при расчете квазистатического повреждения, связанного с односторонне накопленной деформацией, следует использовать ресурс пластичности материала, соответствующий именно такому виду напряженного состояния.

Как видно, дополнительная нагрузка приводит к изменению компонент  $\epsilon_{px}$ ,  $\epsilon_{pt}$ ,  $\epsilon_{pr}$  пластической деформации не только по величине, но и по знаку. Сравнением размахов интенсивности пластической деформации в случае наибольшей нагруженности объекта (знакопеременным изгибом с растягивающей силой) с более простым случаем, когда реализуется лишь знакопеременный изгиб, обнаружили несколько неожиданный эффект: снижение размаха интенсивности пластической деформации. В этой ситуации прогноз долговечности предсказал бы противоречащее здравому смыслу увеличение числа циклов до разрушения. По-видимому, данное обстоятельство связано с формулировкой зависимости для определения интенсивности пластической деформации:

$$\epsilon_{pн} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_{px} - \epsilon_{pt})^2 + (\epsilon_{pt} - \epsilon_{pr})^2 + (\epsilon_{pr} - \epsilon_{px})^2} .$$

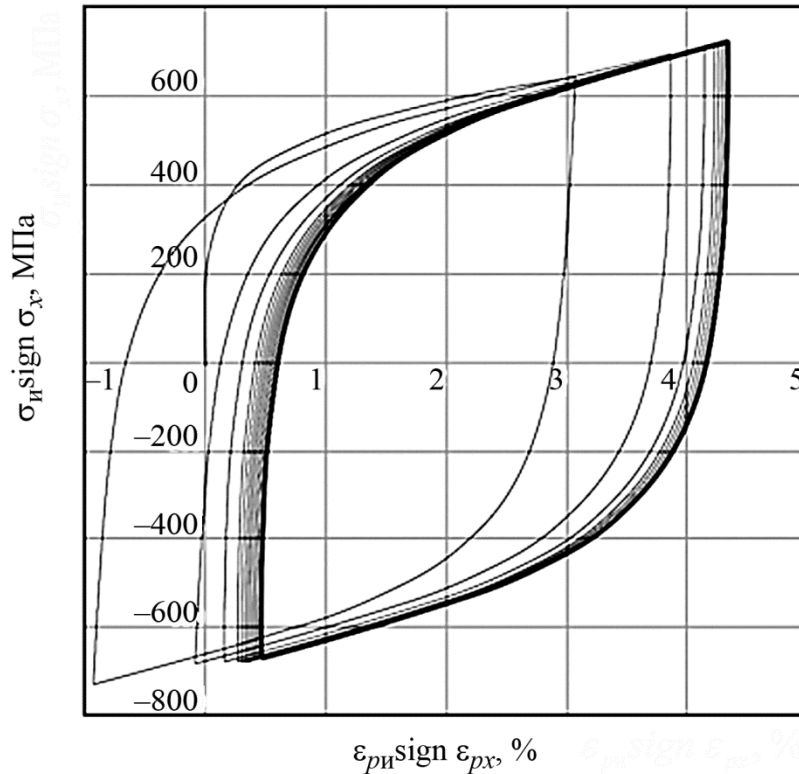


Рис. 12. Результаты расчета кинетики неупругого деформирования до стабилизации цикла, соответствующего одностороннему накоплению деформации на фоне знакопеременного пластического течения (знакопеременный изгиб на оправках, растяжение осевой силой, равной 1000 кН, от собственного веса трубы длиной 2000 м, давление отсутствует)

При приложении дополнительной нагрузки в процессе расчета кинетики НДС компоненты осевой, окружной, радиальной пластической деформации, изменяясь, могут оказаться близки друг к другу, тогда размах интенсивности пластической деформации будет уменьшаться, в отдельных случаях стремясь к нулю. Таким образом, возникает неожиданная ситуация: дополнительная нагрузка приводит к снижению нагруженности материала в опасной точке и, как следствие, к увеличению ресурса. Во избежание подобного парадокса при оценке долговечности вместо *размаха интенсивности пластической деформации*  $\Delta \epsilon_{р и} = \epsilon_{р и i} - \epsilon_{р и j}$ , рядом авторов используется *интенсивность размахов компонент пластической деформации*:

$$\epsilon_{и \Delta p} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\Delta \epsilon_{рх} - \Delta \epsilon_{рt})^2 + (\Delta \epsilon_{рt} - \Delta \epsilon_{рr})^2 + (\Delta \epsilon_{рr} - \Delta \epsilon_{рх})^2}$$

где  $\Delta \epsilon_{рх} = \epsilon_{рхmax} - \epsilon_{рхmin}$ ,  $\Delta \epsilon_{рt} = \epsilon_{рtmax} - \epsilon_{рtmin}$ ,  $\Delta \epsilon_{рr} = \epsilon_{рrmax} - \epsilon_{рrmin}$  – размахи неупругой осевой, окружной и радиальной деформации соответственно – параметра не вполне физического, так как размахи составляющих пластической деформации – осевой  $\Delta \epsilon_{рх}$ , окружной  $\Delta \epsilon_{рt}$  и радиальной  $\Delta \epsilon_{рr}$  – зачастую реализуются неодновременно. Нетрудно видеть, что и в такой формулировке не гарантируется отсутствие упомянутого выше парадокса. В такой ситуации для характеристики интенсивности деформирования может быть использован так называемый среднеквадратичный размах неупругой деформации

$$\overline{\Delta \epsilon_p} = \sqrt{\Delta \epsilon_{рх}^2 + \Delta \epsilon_{рt}^2 + \Delta \epsilon_{рr}^2}$$

который можно интерпретировать как длину вектора в трехмерном пространстве размахов компонент неупругой деформации – параметр также нефизичный, однако гарантирующий качественное соответствие интенсивности деформирования и долговечности.

Наконец, практический интерес представляют карты состояний, отражающие связь вида и параметров неупругого деформирования (знакопеременное пластическое течение, одностороннее накопление деформации на фоне знакопеременного пластического течения) с нагрузками, построенные по результатам расчетов кинетики напряженно-деформированного состояния образцов при ряде сочетаний эксплуатационных нагрузок. Использование карт состояний существенно сокращает затраты сил, времени и средств при выборе режимов реальных испытаний, имитирующих актуальные виды выхода кольтюбинга из строя в условиях эксплуатации. Миниатюры таких карт приведены на рис. 13; при построении использован вполне представительный набор данных (результаты отдельных поцикловых расчетов кинетики НДС до стабилизации). На рис. 14 показана аналогичная карта состояния применительно к связи среднеквадратичного размаха компонент неупругой деформации с перемещением оправок и длиной трубной плети при фиксированном внутреннем давлении 20 МПа.

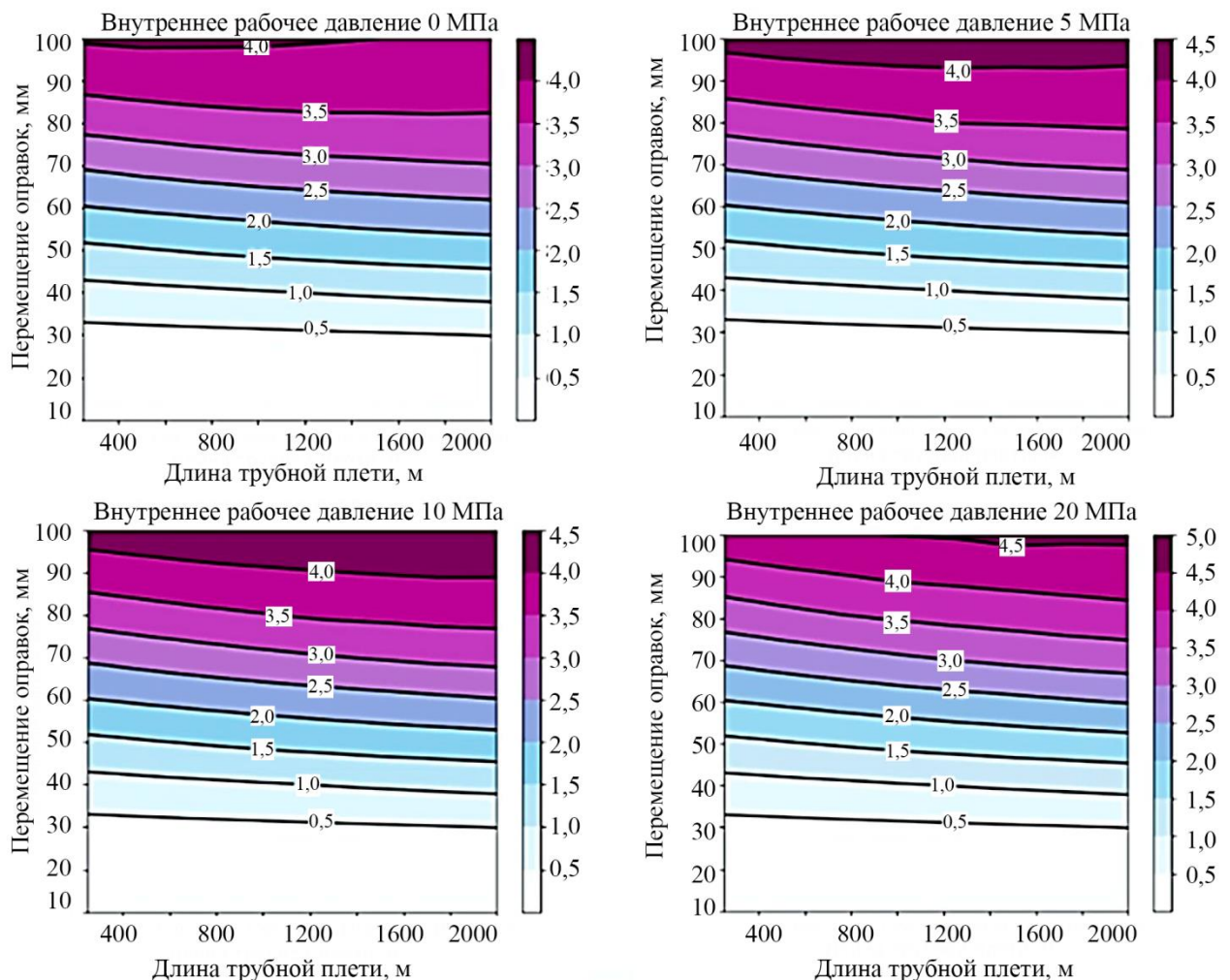


Рис. 13. Карты состояния, иллюстрирующие связь интенсивности размахов компонент неупругой деформации с перемещением оправок и длиной трубной плети при ряде значений внутреннего давления

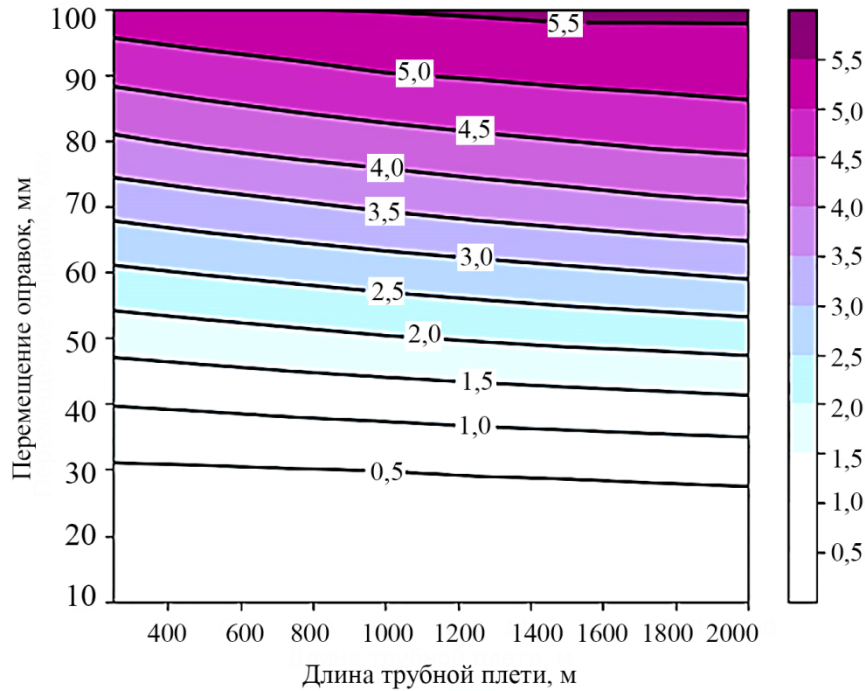


Рис. 14. Карта состояния, иллюстрирующая связь среднеквадратичного размаха компонент неупругой деформации с перемещением оправок и длиной трубной плети (давление 20 МПа)

#### 4. Заключение

Резюмируя вышеизложенное, отметим отличительные черты представленного исследования.

Работа посвящена цифровому моделированию стендовых испытаний колтюбинговых труб. Такой прием позволяет существенно сократить трудоемкость, продолжительность и стоимость реальных испытаний за счет выбора представительных программ нагружения, воспроизводящих предельные состояния трубы в условиях эксплуатации, что свидетельствует об актуальности рассматриваемой научной проблемы.

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что исследованы закономерности неупругого деформирования образцов трубы из стали А606-4 с учетом реальных деформационных свойств при циклическом нагружении, определены типы и параметры этого процесса при различных сочетаниях нагрузок и интенсивности их воздействия, результаты представлены в виде карт состояния.

Работа имеет практическое значение: разработана цифровая модель испытательного комплекса, построены карты состояний, связывающие параметры неупругого деформирования с нагрузками и позволяющие обоснованно спланировать программу экспериментальных исследований, моделирующих различные состояния колтюбинга в эксплуатации. Результаты исследования могут быть полезны производителям труб при назначении гарантийного срока службы изделия, а для эксплуатирующих организаций – при оценке остаточного ресурса.

Достоверность результатов обеспечивается использованием экспериментально полученных деформационных свойств стали при циклическом нагружении, адекватной математической модели деформационных свойств и общепризнанного численного метода, а также применением завоевавшего признание пакета численного анализа напряжено-деформированного состояния.

## Литература

1. Кузнецов Н. Д., Цейтлин В. И. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей. – М. : Машиностроение, 1976. – 216 с.
2. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении : справочник. / Д. А. Гохфельд, Л. Б. Гецов, К. М. Кононов, Е. Т. Кульчихин, Ю. Н. Ребяков, О. С. Садаков, С. А. Тимашев, В. Н. Чепурский. – Екатеринбург : УрО РАН, 1996. – 408 с.
3. Experimental study on the influence of bending and straightening cycles for non-destructive and destructive coiled tubing / Y. Qian-Bei, S. Guohao, W. Gang, L. Jubao, Y. Ming, Z. Qiang // Engineering Failure Analysis. – 2021. – No. 123. – P. 105218. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105218.
4. Порошин В. Б., Буксбаум В. Б., Дружинин П. С. Методика прогнозирования долговечности колонны гибких труб на основе результатов лабораторных и стендовых испытаний // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2014. – Т. 6 (3). – С. 72–77.
5. Ильиных В. Н., Сызранцев В. Н. Построение математической модели для описания данных малоцикловых усталостных испытаний // Фундаментальная наука и технологии – перспективные разработки : материалы международной научно-практической конференции, Москва, 22–23 мая, 2013. – С. 224–226.
6. Порошин В. Б., Уфимцев А. Н. Цифровая модель испытательного стенда и МКЭ-анализ кинетики напряженно-деформированного состояния образцов колтюбинговых труб // Сборник научных статей Всероссийской научной конференции с международным участием, ЦИСП'2023 «Цифровая индустрия: состояние и перспективы развития–2023», Челябинск, 21–23 ноября 2023 г. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2024. – С. 377–386. – URL: <http://omega.sp.susu.ru/glosic2023/articles/039.pdf>
7. [http://help/ans\\_elem/Hlp\\_E\\_SHELL181.html](http://help/ans_elem/Hlp_E_SHELL181.html)
8. Ramberg W., Osgood W.R. Description of stress–strain curves by three parameters. – NASA–TN–902, 1943. – 32 p.