

УДК 621.643

СТЕКЛОПЛАСТИКОВАЯ ТРУБА ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ НЕФТИ И ГАЗА

Цхадая Н.Д., Ягубов З.Х.

Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта

Ягубов Э.З.

*Дальневосточный федеральный университет, филиал в г. Находке
e-mail: em13@bk.ru*

Аннотация. *Одной из главных проблем трубопроводных транспортных систем страны является их подверженность коррозионным разрушениям вследствие контакта материала труб с агрессивными средами. По статистике до 90 % аварий, происходящих на нефтегазопроводах, являются следствием коррозионных процессов. Используемые средства защиты (средства ЭХЗ, ингибиторы коррозии, изоляционные материалы и т.д.) чаще всего оказываются малоэффективными. В связи с этим остро стоит проблема поиска альтернативных путей модернизации нефтегазопроводных систем страны, особенно при транспортировке агрессивных сред. Очевидным перспективным и современным направлением является внедрение труб из высокопрочных и коррозионностойких композиционно-волоконистых материалов (КВМ), в частности стеклопластика.*

В данной статье рассмотрены принципы создания коррозионностойких, герметичных и прочных стеклопластиковых труб для нефтегазовой отрасли.

Ключевые слова: *стеклопластиковая труба, герметичность, герметизирующий слой, трещиностойкость, коррозия*

Основными потребителями труб в нашей стране является нефтегазовая промышленность. Только в основных фондах нефтяных промыслов имеется свыше 20 млн. тонн нефтегазопроводных, водопроводных, обсадных и насосно-компрессорных труб. За последние 10 - 15 лет в отечественном трубопроводном транспорте сложилась устойчивая тенденция увеличения числа крупных аварий с ростом тяжести социальных, экономических и экологических последствий. Учитывая, что системы нефтяной промышленности работают в тяжелых условиях комплексного воздействия механических нагрузок, химического и абразивного воздействия, особенно солесодержащих пластовых вод, сероводорода и углекислого газа, назначенные сроки службы труб не выдерживаются и они выходят из строя значительно раньше и служат от нескольких месяцев до 2 - 3 лет (в особо тяжелых условиях).

Трубы из стеклопластика имеют при этом существенные преимущества.

В настоящее время российский рынок стеклопластиков находится на начальном этапе развития. Спрос на данную продукцию только начинает формироваться.

Как показал анализ [5, 9, 10], переход на применение стеклопластиковых труб взамен стальных обусловливается следующими их преимуществами:

- высокая удельная прочность;
- высокая коррозионная стойкость;
- инактивность к парафиновым отложениям, что снижает гидравлическое сопротивление, повышая тем самым пропускную способность и снижает потребление энергетических ресурсов;
- повышенный срок службы (по различным оценкам – от 25 лет и более).
- возможность формирования трубных конструкций с заданными свойствами в силу анизотропии свойств композитных материалов;
- низкая теплопроводность (снижение затрат на изоляционные материалы);
- небольшая масса изделий, позволяющая при погрузочно-разгрузочных работах и монтаже обходиться облегченным комплексом подъемно-транспортных машин;
- низкая трудоемкость монтажно-демонтажных работ.

Однако, недостаток стеклопластиковых труб, эксплуатирующихся под действием нагрузок, в частности, под действием внутреннего давления – это низкая стойкость к трещинообразованию поперек волокон. Следует отметить, что стеклопластики при нагружении имеют тенденцию к прогрессирующему и необратимому повреждению. В некоторых случаях нагрузка при возникновении повреждений составляет всего лишь 10 % от соответствующего статического предела прочности. Детальный характер поврежденности зависит от многих факторов, описывающих вид нагружения, расположение армирующих элементов, свойства матрицы и поверхности раздела и т.д. В условиях растяжения первый признак поврежденности обычно проявляется в виде отслаивания волокон от матрицы в местах, где волокна перпендикулярны направлению нагружения. С ростом нагрузки поврежденность увеличивается вплоть до полного разделения образца, и как показали исследования процессы, разрушения зависят и от времени (длительная прочность) и от числа циклов (усталость).

После обязательных гидроиспытаний в структуре стеклопластика под действием возникающих напряжений происходит образование в связующем микротрещин, которые приводят к резкому повышению проницаемости стенок. Но проницаемость стенок еще не означает их негерметичность, так как герметичность характеризуется не проницаемостью вообще, а проницаемостью конкретной среды через рассматриваемую стенку. При этом следует учесть, что проницаемость стеклопластиковых стенок при одном и том же уровне нагружения существенно зависит от количества нагружений (многократности) и стремительно растет при их повторениях.

Справедливости ради следует отметить, что поскольку вклад связующего в общую прочность стеклопластиковой стенки составляет не более 3 % [3], то на

первом этапе процессы трещинообразования не приводят к заметному снижению прочности стенки трубы. Однако при эксплуатации трубопровода под воздействием многократных и циклических нагрузок возникшие в структуре стенки трещины могут стать первопричиной снижения прочности и разрушения трубы, связанной с тем, что рабочая среда, проникая в структуру материала стенки, вызывает нарушение и ослабление внутренних адгезионно-когезионных связей.

Начало заметного растрескивания стенок стеклопластиковой трубы под действием внутреннего давления наступает уже при $P_{расст} = (0,15 \div 0,18) P_{раб}$ [5, 7, 9], или при напряжениях $\sigma = (0,2 \div 0,3) \sigma_в$, где $\sigma_в$ – временное сопротивление композиционного материала, т.е. когда σ превышает предел монолитности, а если используются связующие материалы с повышенной жесткостью, то и раньше [1]. Это характерное потрескивание стеклопластиковой трубы слышно невооруженным человеческим ухом при некотором уровне напряжений в материале, далеко от разрушающих. При дальнейшем деформировании потрескивание пропадает и возникает вновь непосредственно перед разрушением изделия.

Эти признаки первичного слышимого потрескивания стеклопластика под нагрузкой определяют нижний порог трещинообразования. Визуальное наблюдение позволяет обнаружить появление в этот момент в поверхностном смоляном слое стеклопластиковой стенки сетки трещин.

Как показывают эксперименты [3, 5, 7], процесс трещинообразования в стеклопластиковой стенке трубы неизбежен. Таким образом, одним из главных задач при проектировании стеклопластиковых труб является обеспечение их герметичности.

Применяемые в настоящее время технологии герметизации, а именно использование внутренних эластомерных герметизирующих слоев, оказывается малоэффективным ввиду имеющего место «кессонного явления» [5, 8], заключающегося в отслаивании и вздутии эластомерного герметизирующего слоя вдоль всей внутренней поверхности труб при резких сбросах давления, что делает невозможным дальнейшую эксплуатацию таких труб (рис. 1).

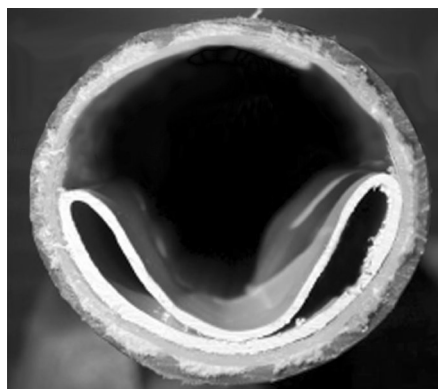


Рис. 1. Проявление «кессонного эффекта» при сбросах давления в стеклопластиковой трубе

В данной работе авторами предлагается способ герметизации стеклопластиковых труб, позволяющий избегать проявления «кессонного эффекта».

В ходе поиска альтернативных возможностей и синтеза базового конструктивно-технологического решения элементов проектируемой конструкции герметичной стеклопластиковой трубы в первую очередь решались следующие задачи:

- монолитность силовой оболочки и технологическая рациональность ее производства;

- герметичность стенок стеклопластиковых труб в условиях долговременного и многократного нагружения, а также технологическая рациональность технического решения;

- непроницаемость герметизирующего слоя и технологическая рациональность его изготовления;

- экологическая безопасность, долговечность и многофункциональность трубопроводных транспортных систем из стеклопластика.

Анализ различных вариантов герметизации стеклопластиковых труб показал, что задача создания непроницаемого трубопровода сводится к решению проблемы упругой (обратимой) деформации непроницаемых металлических или неметаллических (в частности, полиэтиленовых) оболочек, отслеживающих упругую деформацию силовой оболочки из стеклопластика без нарушения сплошности или без каких-либо внутривидовых перестроек. При этом следует учитывать, что показатели упругой деформации стеклопластика превышают показатели металла в 4 - 5 раз.

Учитывая вышесказанное, была разработана конструкция бислойной трубы [2, 5, 8, 10], позволяющая решить проблему герметизации стеклопластиковой трубы, предотвратить проницаемость транспортируемых сред через герметизирующий слой, ликвидировав тем самым угрозу отслоения и разрушения герметизирующей оболочки при сбросе внутреннего давления («кессонное явление»).

Это достигается за счет того, что в тонкослойных металлических герметизирующих оболочках предложено использовать конструктивно-технологическую концепцию их рифления. При нагружении трубы внутренним давлением силовая оболочка претерпевает упругие деформации растяжения и в тангенциальном и в коаксиальном направлениях. Для предотвращения разрыва от тангенциальных напряжений или отслоения от силовой стенки тонколистовой упругой герметизирующей оболочки, упругая деформация которой при разрыве меньше упругой деформации стеклопластиковой оболочки трубы, герметизирующая оболочка выполняется с системой радиальных складок, образующих ребра жесткости, обращенные внутрь трубы (рис. 2).

Таким образом, герметизирующая оболочка оказывается при действии внутреннего давления транспортируемой среды не нагруженной, адаптивно отслеживая радиальную деформацию силовой оболочки трубы. Такая конструктивно-тех-

нологическая концепция применима и в случае использования в качестве ГС полимерного материала, например полиэтилена, который при действии внутреннего давления транспортируемой среды, не испытывая плоского двухосного растяжения, уже не будет претерпевать надмолекулярно-структурной перестройки, приводящей к его разуплотнению и образованию каналов проницаемости в нем. Благодаря такой технологии, непроницаемость полимерной герметизирующей оболочки трубы существенно повышается. Кроме этого, подобный герметизирующий слой имеет ряд преимуществ перед гладким герметизирующим слоем: меньший вес при том же гидравлическом сопротивлении и давлении, повышенная гибкость, способность противостоять сдвиговым деформациям, экономия сырья при производстве рифленых герметизирующих слоев достигает 50 %.

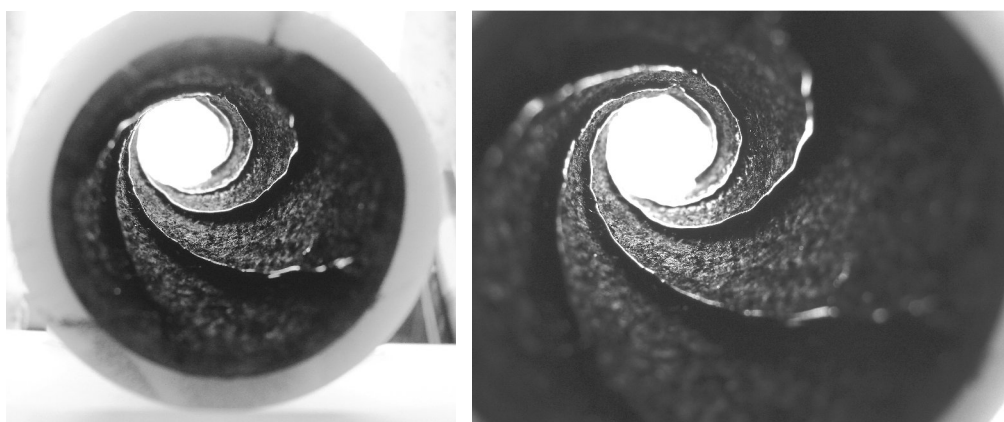


Рис. 2. Стеклопластиковая труба с рифленым (спирально-винтовым) герметизирующим слоем

Чтобы исключить всякую возможность коробления, утяжек и скручивания спирально-рифленой непроницаемой оболочки при нагружении трубопровода внутренним давлением, угол подъема этих рифлений должен быть равен $\pm 55^{\circ}44'$, т.е. должен соответствовать равновесной траектории намотки изделий из композиционных материалов. В общем случае, когда силовая оболочка трубы претерпевает упругие деформации ε_r и ε_0 , угол спиральных рифлений может быть определен по формуле

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_0}.$$

Конструкция стеклопластиковой трубы с рифленым герметизирующим слоем позволяет не только избежать нежелательных явлений в виде «кессонного отслаивания» и разгерметизации стенок трубы, но и не препятствует скорости движения потока, иногда даже ускоряет его по сравнению с металлической трубой, повышая тем самым пропускную способность такого трубопровода в целом.

Технологический процесс производства такой трубы базируется на следующих основополагающих началах:

1. Обеспечение точности выходных геометрических параметров (ВГП) жестких крупногабаритных элементов конструкций по методу инверсионного переноса форм и размеров копируемой технологической оправки (безразмерный способ достижения точности);

2. Обеспечение точности ВГП жестких базовых деталей по принципу последовательных уточнений и компенсации производственных погрешностей сборки;

3. Обеспечение взаимозаменяемости элементов по размерно-геометрическим параметрам по методу связного (зависимого) изготовления сопрягаемых деталей.

Использование указанных технологических принципов разработки технологического процесса изготовления труб позволяет решать проблемы точности, качества и взаимозаменяемости объекта производства при минимальных затратах труда и средств, при низких трудоемкости и себестоимости продукции.

В процессе проектирования базового технологического процесса изготовления трубы разработанной конструкции, необходимо решение следующего комплекса взаимосвязанных и взаимообусловленных задач:

– *размерно-геометрическая*: точность геометрических форм и размеров поверхностей конфигурации элементов трубы; точность конфигурации элементов и ВГП трубы;

– *материально-техническая*: механические (прочностные) свойства элементов и конструкций трубы; функциональные свойства элементов конструкций трубы;

– *техничко-экономическая*: минимизация трудоемкости изготовления элементов и трубы в целом; минимизация себестоимости производства элементов в конструкции в целом.

Выводы

Стеклопластиковые трубы наряду с очевидными преимуществами, обладают существенным недостатком – низкой трещиностойкостью при действии нагрузок поперек волокон, что является одним из главных сдерживающих факторов их широкого использования в нефтегазовой отрасли. Применяемые традиционные технологии герметизации с использованием внутренних герметизирующих слоев сопровождаются возникновением «кессонного явления» при сбросах внутреннего давления, что исключает возможность дальнейшей эксплуатации этих труб. Предложенная авторами уникальная технология герметизации стеклопластиковых труб внутренним рифленным герметизирующим слоем, надежность которой подтвер-

ждена экспериментально, позволяет решить проблему герметичности и повысить эксплуатационную надежность этих труб.

Литература

1. Бычков Е.А., Цыплаков О.Г. Опыт конструирования стеклопластиковых баллонов высокого давления // Сб. статей «Волокнистые композиционные материалы», Пермь: Пермское книжное издательство, 1972. С. 17 - 25.
2. Патент № 2117206 РФ. МПК F16L9/14. Труба для транспортирования агрессивной среды под высоким давлением. / О.Г. Цыплаков, Н.Д. Цхадая, В.Н. Не-редов, Э.З. Ягубов, З.Х. Ягубов. Заявл. 14.03.97; опубл. 10.08.98; бюлл. № 22.
3. Цыплаков О.Г. Научные основы технологии композиционно-волокну-стых материалов. В 2-х ч. Пермь: Пермское книжное издательство, 1974, 1975.
4. Цыплаков О.Г., Цхадая Н.Д., Ягубов Э.З., Ягубов З.Х. Стеклопластико-вая труба для транспортирования агрессивной среды под высоким давлением // Информационный листок Коми ЦНТИ № 10. Сыктывкар, 1999. 4 с.
5. Ягубов Э.З. Композиционно-волокну-стые трубы в нефтегазовом комп-лексе: монография / под ред. д.т.н., проф. И.Ю. Быкова. М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2008. 271 с.
6. Ягубов Э.З. Высоконапорные герметичные стеклопластиковые трубы для нефтегазовой промышленности // Конструкции из композиционных материа-лов. 2006. № 3 (август-сентябрь). С. 42 - 49.
7. Ягубов Э.З. Механизм нарушения герметичности трубопроводов из ком-позиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2010. № 1. С. 53 - 63.
8. Ягубов Э.З. Проблема «кессонного явления» в высоконапорных стекло-пластиковых трубах с герметизирующим слоем. Находка, Находкинский инже-нерно-экономический институт, 2006. 11 с.: ил. Деп. в ВИНТИ РАН 20.11.06, № 1419 – В2006.
9. Ягубов Э.З. Стеклопластиковые трубы: проблемы и перспективы при-менения в нефтегазовой промышленности // Технологии нефти и газа. 2006. № 5. С. 61 - 67.
10. Ягубов Э.З. Стеклопластиковые трубы – будущее экологически без-опасного нефтегазопроводного транспорта // Защита окружающей среды в нефте-газовом комплексе. 2007. № 7. С. 20 - 23.

USE OF GLASS-REINFORCED PLASTIC PIPES IN THE TRANSPORTATION OF NATURAL GAS AND OIL

N.D. Tskhadaya, Z.Kh. Yagubov

Ukhta State Technical University, Ukhta, Russia

E.Z. Yagubov

Far Eastern Federal University (Branch in Nakhodka), Russia

e-mail: em13@bk.ru

Abstract. *One of the key problems of the carrier pipeline systems in the country is their exposure to corrosion failures caused by the interaction of pipe material and aggressive environments. According to statistics about 90 % of all pipeline emergencies are due to corrosive processes. Protectives in use (means of electrochemical protection (ECP means), corrosion prevention chemicals (corrosion inhibitors), insulation materials, etc.) are mostly turn out to be inefficient. In this respect the acute problem of searching the alternative ways of upgrading the oil and gas pipeline systems in the country arises, especially when transporting aggressive environments. The application of pipes made of high-strength and corrosion-resistant composite and fiber patterns (CFP) is considered to be an evidently advanced and up-to-date trend.*

The objective of this article is to clarify the principles of development of corrosion-resistant, leak tight and strong GRP pipes for the natural gas and oil industry.

Keywords: *glass-reinforced plastic pipe (GRP pipe), leak tightness, packing layer, fracture strength, corrosion*

References

1. Bychkov E.A., Tsyplakov O.G. Opyt konstruirovaniya stekloplastikovykh ballonov vysokogo davleniya (Experience in design of fiberglass pressure vessels), *Sb. statei «Voloknistye kompozitsionnye materialy» (Collection of articles "Fibrous composites")*, Perm, Permskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1972. PP. 17 - 25.
2. Patent № 2117206 RU. IPC F16L9/14. Pipe for transportation of high-pressure aggressive medium / O.G. Tsyplakov, N.D. Tskhadaya, V.N. Neredov, E.Z. Yagubov, Z.Kh. Yagubov. Appl.: 14.03.97; Publ.: 10.08.98.
3. Tsyplakov O.G. Nauchnye osnovy tekhnologii kompozitsionno-voloknistykh materialov (Scientific fundamentals of technology of fibrous composite materials). In 2 parts. Perm, Permskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1974, 1975.
4. Tsyplakov O.G., Tskhadaya N.D., Yagubov E.Z., Yagubov Z.Kh. Stekloplastikovaya truba dlya transportirovaniya agressivnoi sredy pod vysokim davleniem (Fiberglass pipe for transportation of aggressive media under high pressure), *Informatsonnyi listok Komi TsNTI (Information Sheet of Komi CNTI)*, Issue 10. Syktyvkar, 1999. 4 p.
5. Yagubov E.Z. Kompozitsionno-voloknistye truby v neftegazovom komplekse (Composite-fiber pipes in oil and gas industry). Ed.: prof. I.Yu. Bykov. Moscow, Tsentr-LitNefteGaz, 2008. 271 p.

6. Yagubov E.Z. Vysokonapornye germetichnye stekloplastikovyе trubы dlya neftegazovoi promyshlennosti (High-pressure air-tight glass-fibre pipelines for oil and gas industry), *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2006, Issue, pp. 42 - 49.

7. Yagubov E.Z. Mekhanizm narusheniya germetichnosti truboprovodov iz kompozitsionnykh materialov (Mechanism of leaktightness abnormality of composite pipes) *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2010, Issue 1, pp. 53 - 63.

8. Yagubov E.Z. Problema «kessonogo yavleniya» v vysokonapornykh stekloplastikovykh trubakh s germetiziruyushchim sloem (The problem of "caisson phenomenon" in high-pressure fiberglass tubes with a sealing layer). Nakhodka, Nakhodkinskii inzhenerno-ekonomicheskii institut, 2006. 11 p. VINITI RAN deposit 20.11.06, № 1419 – B2006.

9. Yagubov E.Z. Stekloplastikovyе trubы: problemy i perspektivy primeneniya v neftegazovoi promyshlennosti (Fiberglass pipes: problems and prospects of application in the oil and gas industry), *Tekhnologii nefti i gaza*, 2006, Issue 5, pp. 61 - 67.

10. Yagubov E.Z. Stekloplastikovyе trubы – budushchee ekologicheskii bezopasnogo neftegazoprovodnogo transporta (Fiber-glass plastic pipes – the future of ecologically safe oil and gas pipeline transport), *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse*, 2007, Issue 7, pp. 20 - 23.