

УДК 681.586.5

Е.И. Казанцев¹, И.С. Шелемба²¹Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия²ООО «Инверсия-С», Пермь, Россия

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ ВЯЗКОСТИ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ

Рассмотрена возможность разработки датчика для устройства непрерывного измерения и контроля вязкости в потоке высоковязких текучих сред (от 20...6000 Па·с) с использованием чувствительных элементов на основе волоконно-оптических брегговских решеток.

Исследована возможность прямого замера силы вязкого трения среды, перемещаемой по технологическому трубопроводу, относительно неподвижного чувствительного зонда, погруженного в измеряемую среду.

Ключевые слова: волоконно-оптические брегговские решетки, измерение вязкости, высоковязкие текучие среды.

E.I. Kazantsev¹, I.S. Shelemba²¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia²«Inversion-S» LLC, Perm, Russia

FIBER OPTICAL SENSOR FOR CONTINUOUS CONTROL OF VISCOSITY OF A FLUID

The paper considers the possibility of developing a sensor for a device for continuous measurement and control of viscosity in a flow of highly viscous fluids (from 20 ... 6000 Pa * s) using sensitive elements based on fiber-optic Bragg gratings.

The possibility of direct measurement of the viscous friction force of a medium moving through a process pipeline relative to a motionless sensitive probe immersed in a measured medium is investigated.

Keywords: fiber-optic Bragg gratings, viscosity measurement, highly viscous fluids.

Введение

Высокопроизводительные технологические процессы перерабатывающих производств, например, на горнодобывающих и обогащательных фабриках, гидрометаллургических и химических производствах, предприятиях бумажной промышленности и др., являются, как правило, непрерывными. При этом существуют задачи непрерывного

контроля вязкости различных сырьевых суспензий при их подготовке, транспортировке и в процессе технологической переработки.

На химических предприятиях оборонной отрасли существуют технологические процессы по переработке высоковязких полимеризующихся текучих сред с вязкостями от 100 до 100 тыс. Па·с [1], при этом показатель вязкости таких сред в течение всего технологического цикла является одним из важнейших технологических параметров.

Создание средств непрерывного контроля вязкости реологически сложных текучих сред является актуальной задачей.

Существующие электромеханические устройства, основанные на измерении усилия от натекающей на зонд датчика контролируемой жидкости [2, 3, 4], применяемые для непрерывного контроля вязких сред, характеризуются невысокой точностью измерений и относительно большими габаритами. Использование датчиков вибрационного типа [5] ограничено диапазоном измерения сравнительно маловязких (до 20 Па·с) жидкостей типа нефтепродуктов по причине отслаивания измеряемой среды от колеблющейся поверхности зонда датчика, что не решает проблему контроля вязкости суспензий, паст и других подвижных сред с вязкостями от 50...600 Па·с и выше.

Появление высокочувствительных волоконно-оптических датчиков на основе волоконных брегговских решеток (ВБР), а также оптических интеррогаторов (лазерных интерферометров) позволило в различных областях науки и техники расширить круг решаемых задач по высокоточному измерению микроперемещений, давлений, профилей и скоростей движения потока жидкости, деформации, температуры [6, 7]. Однако возможность использования волоконно-оптических датчиков для прямого измерения сил вязкого трения в движущихся средах нами не была установлена. Возможными причинами такого положения могли стать высокие требования к чувствительности из-за малых сил вязкого трения, возникающих на поверхности измерительного зонда, контактирующего со средой, при измерении маловязких жидкостей, а также относительно высокая стоимость измерительной аппаратуры.

Целью настоящей работы является исследование возможности создания датчика для устройства непрерывного измерения и контроля вязкости в потоке высоковязких текучих сред (от 20...6000 Па·с) с использованием чувствительных элементов на основе волоконно-оптических брегговских решеток (ВБР).

Задачи исследования включают:

- оценку возможности использования в качестве чувствительного элемента датчика для устройства измерения и контроля вязкости в потоке в диапазоне от 20...6000 Па·с и более чувствительного элемента на основе ВБР, выпускаемых серийно;
- разработку конструкции и изготовление опытного образца чувствительного зонда датчика;
- проведение испытаний опытного образца датчика в лабораторных условиях и анализ полученных результатов.

Структурная схема предлагаемого устройства для измерения вязкости, включающая основные конструктивные элементы датчика и их связи, показана на рис. 1.

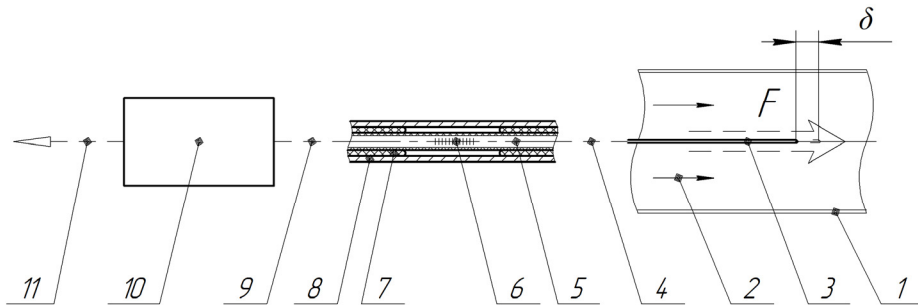


Рис. 1. Структурная схема устройства для измерения вязкости: 1 – технологический трубопровод; 2 – поток текучей среды; 3 – зонд; 4 – силовая связь; 5 – оптическое волокно; 6 – ВБР; 7 – клеевой состав; 8 – защитная оболочка; 9 – информационная оптическая связь; 10 – оптический интеррогатор (лазерный интерферометр); 11 – информационная связь с внешним устройством; F – сила вязкого трения, возникающая на поверхности зонда; δ – деформация зонда от воздействия силы F

Особенностью предложенной конструкции является прямой замер силы вязкого трения среды, перемещаемой по технологическому трубопроводу, относительно неподвижного чувствительного зонда, погруженного в измеряемую среду.

Сила вязкого трения F , приложенная к омываемой текущей средой поверхности зонда 2, деформирует его и размещенные внутри чувствительные волоконно-оптические элементы 5 и 6 на величину δ , которые реагируют на это смещением спектра отражения светового импульса, посылаемого оптическим интеррогатором 10 по волоконно-оптической линии связи 9. Интеррогатор 10 обрабатывает сигналы, оп-

ределяет величину микроперемещения зонда δ и пересчитывает ее в мгновенные значения вязкости с учетом температуры и скорости течения продукта, его реологических характеристик. Далее передает данные II на внешние устройства.

В качестве чувствительного элемента датчика использован серийно выпускаемый волоконно-оптический чувствительный элемент с одиночной ВБР, размещенный в защитной оболочке из тонкостенной металлической или пластмассовой капиллярной трубки, используемой как зонд датчика. Для учета влияния температуры на изменение вязкости продукта, а также термокомпенсации измерения величин деформации ВБР устройство для измерения вязкости должно иметь волоконно-оптический датчик температуры, размещенный в недеформируемой части зонда.

Основные зависимости, поясняющие схему функционирования датчика в условиях ламинарного потока ньютоновской и псевдоньютоновской жидкости, включают в себя известное уравнение силы вязкости (внутреннего трения):

$$F = -\mu (dw/dl)S, \quad (1)$$

где μ – динамическая вязкость (коэффициент внутреннего трения); dw/dl – градиент скорости; S – площадь зонда, на которую действует сила F , и группу формул, связывающих величину деформации ВБР с действующими на поверхности зонда составляющими силы вязкости:

$$F = F_B + F_K = F_B (1 + F_K/F_B), \quad (2)$$

где F_B и F_K – силы, действующие на оптическое волокно и защитную оболочку (корпус зонда) соответственно.

Из условия равенства деформации ε волокна и защитной оболочки на участке ВБР

$$\varepsilon = F_B / (S_B E_B) = F_K / (S_K E_K), \quad (3)$$

где S_B и S_K , E_B и E_K – площади сечений и модули продольной упругости оптического волокна и материала защитной оболочки (корпуса зонда), и представив, зависимость (3) в виде

$$F_K / F_B = S_K E_K / (S_B E_B) = f, \quad (4)$$

где коэффициент f отражает долю общей силы, воспринимаемой защитной оболочкой (корпусом зонда), и характеризует качество конструкции измерительной части датчика, получаем обобщающее выраже-

ние для оценки вязкости по данным гидродинамики течения жидкости и величины деформации ВБР:

$$\mu = k \varepsilon (1 + f) (S_B / S) E_B / (dw/dl), \quad (5)$$

где k – поправочный коэффициент, учитывающий особенности измерения вязкости реологически сложных жидкостей и влияния преднагружения волокна при формировании ВБР.

В частности, течение вязкопластичных жидкостей характеризуется двумя критериями подобия – числом Рейнольдса, определяющим влияние структурной вязкости, и так называемым «параметром пластичности» жидкости. При разработке расчетной модели обработки данных измерения течения таких жидкостей в технологических трубопроводах необходимо будет учитывать данные критерии, вводя существующие графические зависимости, комплексно учитывающие дополнительный параметр [8].

В качестве тестовой задачи для разработки опытного образца датчика для устройства контроля и измерения вязкости был выбран технологический процесс подачи пастообразного топливного состава [9] с динамической вязкостью порядка 100 Па·с с температурой 40 °С при снаряжении корпуса газогенератора [10] через технологический трубопровод диаметром 50 мм с постоянными объемными скоростями подачи порядка 50...150 мм/с.

В качестве чувствительного элемента датчика для устройства контроля и измерения вязкости была выбрана одиночная волоконно-оптическая брегговская решетка ASTRO F [11], выполненная на оптическом кварцевом волокне типа Панда ($D = 0,125$ мм, $E = 7,2 \cdot 10^{10}$ Па).

В качестве защитной оболочки чувствительного элемента – корпуса зонда была выбрана капиллярная трубка из нержавеющей стали ($D = 0,8 / 0,75$ мм, $L = 50$ мм, $E = 20 \cdot 10^{10}$ Па).

Из зависимости (5) следует, что чувствительность и точность измерений вязкости существенно зависят от конструктивного исполнения зонда и характеристик применяемых для его изготовления материалов.

Для оценки работоспособности устройства были рассчитаны величины усилий F , возникающие на поверхности зонда при его обтекании вязкой средой с выбранными параметрами вязкости, скорости движения и конструктивными особенностями технологического тру-

бопровода. Определены расчетные величины деформации зонда δ в зависимости от его конструктивного исполнения. При разработке использовался опыт создания оптических датчиков [12, 13].

По результатам оценки выбранной конструкции датчика установлено, что его чувствительность с защитным корпусом из металлической капиллярной трубки достаточна лишь при измерении сред с вязкостями более 300 Па·с и выше.

Для повышения показателя чувствительности было принято решение заменить защитную оболочку датчика из металлической трубки на защитное покрытие оптического волокна в виде полимерной оболочки, имеющей меньший модуль продольной упругости. В качестве материала для полимерного покрытия была выбрана акриловая композиция ($E = 3 \cdot 10^9$ Па). Расчетная толщина защитного покрытия была выбрана 0,5 мм.

Результаты оценки конструкции датчика с полимерным покрытием показали приемлемую чувствительность датчика для измерения сред с вязкостями в интересующем диапазоне 20 ... 600 Па·с.

Для проверки расчетов были изготовлены два варианта датчиков – оптическое волокно с защитной оболочкой из металлической капиллярной трубки и оптическое волокно с полимерным покрытием. Работы по изготовлению датчиков проводились на производственной базе ООО «Инверсия-С», г. Пермь.

Волокно с ВБР закреплено в полости капиллярной трубки по технологии ООО «Инверсия-С». Внешний вид зонда с металлическим корпусом приведен на рис. 2.

Для изготовления зонда с защитным покрытием из полимерной композиции на волокно наносился акриловый полимер путем окунания. Толщина покрытия контролировалась микрометром.

Работоспособность оптических чувствительных элементов датчиков была проверена по методике предприятия ООО «Инверсия-С». Это процесс обтекания зонда высоковязкой текучей средой с заданными скоростями моделировался путем нагружения зонда с приложением продольной растягивающей нагрузки грузами известного веса, выбранного расчетным путем для тестовых условий. Влиянием собственного веса участка зонда пренебрегали.

Работа чувствительных элементов в ходе эксперимента фиксировалась оптическим интеррогатором (стоечным анализатором сигналов

ASTRO A31x) производства ООО «Инверсия-С» [14, 15, 16]. В ходе эксперимента регистрировались величины относительного смещения опорной длины волны лазера оптического интеррогатора в зависимости от растягивающей нагрузки F , приложенной к зонду. Частота опроса чувствительного элемента составляла 1 измерение в секунду. На приведенных осциллограммах по оси X указано количество измерений n . Осциллограммы измерений представлены на рис. 3, 4, 5.

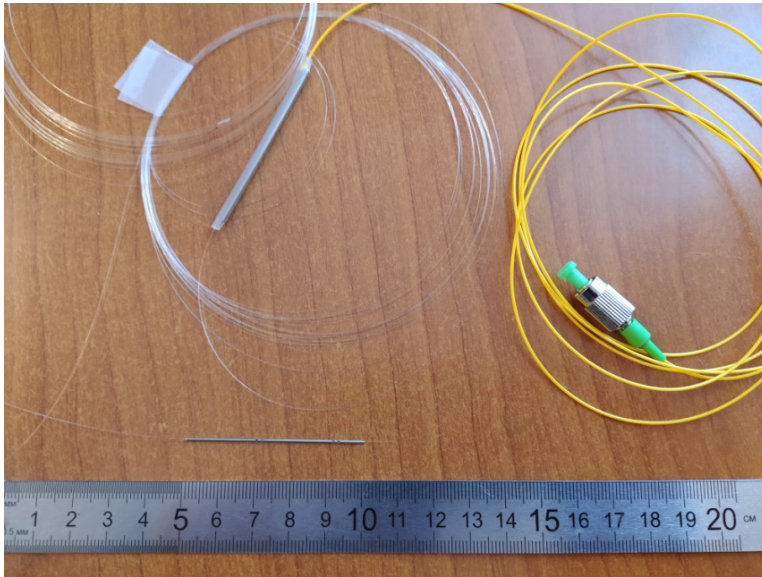


Рис. 2. Внешний вид зонда датчика с металлическим корпусом

Пересчет смещения опорной длины волны в относительную деформацию выполнен по зависимости:

$$\varepsilon = 10^6/k (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 - B (t - t_0), \quad (6)$$

где ε – деформация; 10^6 – масштабный коэффициент; k – коэффициент тензочувствительности; λ – текущая длина волны, нм; λ_0 – опорная (калибровочная) длина волны, нм; B – калибровочный коэффициент термокомпенсации, мкм/(м \cdot °C); t – текущая температура ВБР, °C; t_0 – температура калибровки ВБР при определении λ_0 , °C.

Результаты расчетов и измерений сведены ниже в таблице.

Графики изменения относительной деформации зондов от приложенной нагрузки представлены на рис. 6, 7.

Вес груза, г	Сила трения, Н	Вязкость, Па·с	Деформация зонда, $\Delta L/L$, мкм/м			
			Металлический		Полимерный	
			Расчет	Замер	Расчет	Замер
1	0,009806	20,81	–	–	11,09	17,44
2	0,019613	41,62	–	–	22,19	31,72
30	0,294199	624,32	32,22	74,39	332,97	328,37
50	0,490332	1040,54	53,70	113,29	554,95	542,88
70	0,686465	1456,76	75,18	128,02	776,94	752,92
90	0,882598	1872,98	–	–	–	–
123	1,206218	2559,75	132,11	146,54	1365,20	1329,29
140	1,372931	2913,53	150,37	150,05	–	–
167	1,637710	3475,43	179,37	162,87	–	–
218	2,137850	4536,79	234,15	172,88	–	–
247,5	2,427146	5150,71	–	–	2747,04	2636,59

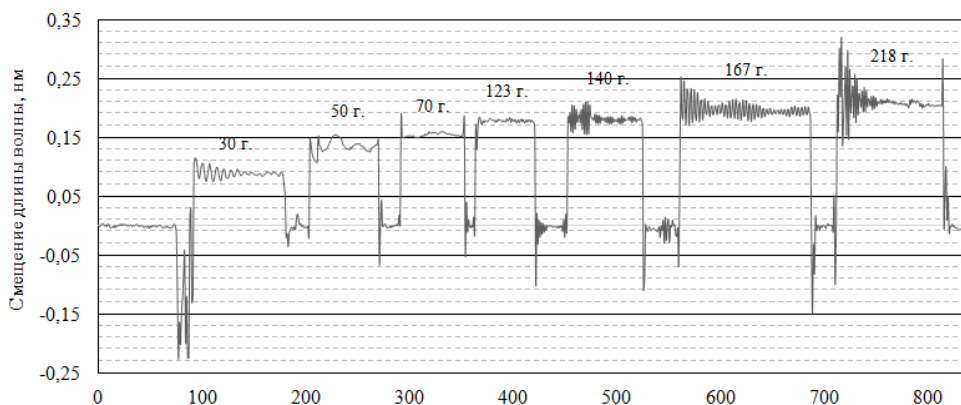


Рис. 3. Изменение длины волны при нагружении зонда с металлическим защитным покрытием в диапазоне 0...218 г

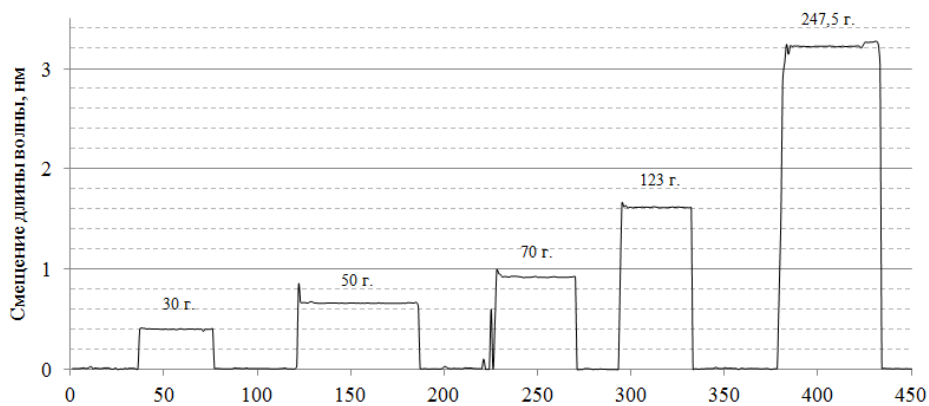


Рис. 4. Изменение длины волны при нагружении зонда с полимерным защитным покрытием в диапазоне 0...247,5 г

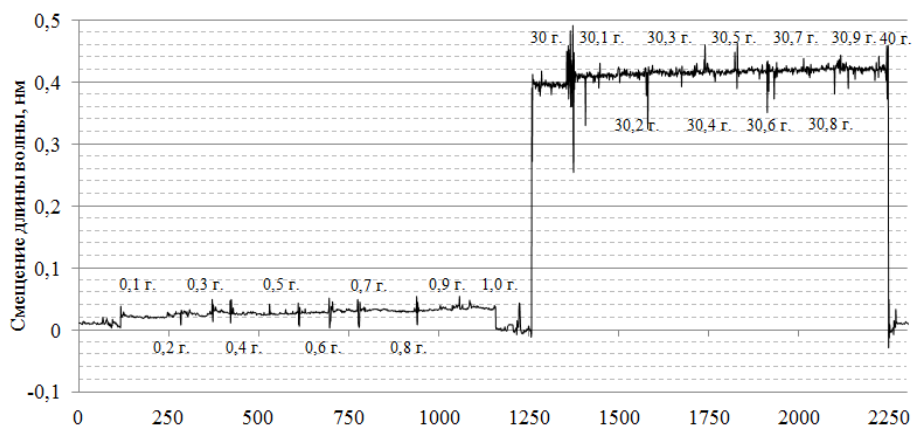


Рис. 5. Изменение длины волны при нагружении зонда с полимерным защитным покрытием в диапазоне 1,0...2,0 г и 30,0...32,0 г

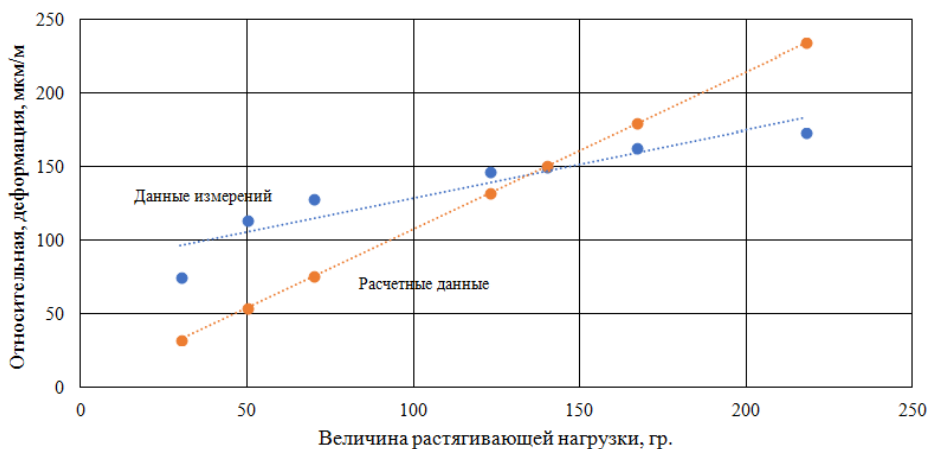


Рис. 6. Графики относительных деформаций зонда с металлическим корпусом при нагружении в диапазоне 30,0...247,5 г

Полученные результаты показывают удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных результатов, подтверждают возможность создания датчика прямого замера силы вязкого трения для устройства непрерывного измерения и контроля вязкости текучих сред в потоке.

Вместе с этим стоит обратить особое внимание на выбор материала, используемого при разработке конструкции измерительного зонда датчика, так как величины вязкого трения, возникающие на зонде при течении среды, не всегда достаточны для обеспечения удовлетворительного уровня чувствительности и точности измерений. Так,

использование металлической капиллярной трубки в качестве корпуса зонда в изначально выбранной нами опытной конструкции ограничивает возможности проведения измерений на средах с вязкостями ниже 600 Па·с. Использование полимерного защитного покрытия в качестве корпуса зонда обеспечивает более высокую чувствительность измерений. Однако подобные покрытия в условиях реальной эксплуатации на промышленных установках будут значительно уступать металлическим по обеспечению защиты чувствительного оптического волокна с ВБР. К тому же полимерные материалы в течение длительного времени изменяют свои прочностные характеристики, что может отразиться на точности измерений в сторону снижения.

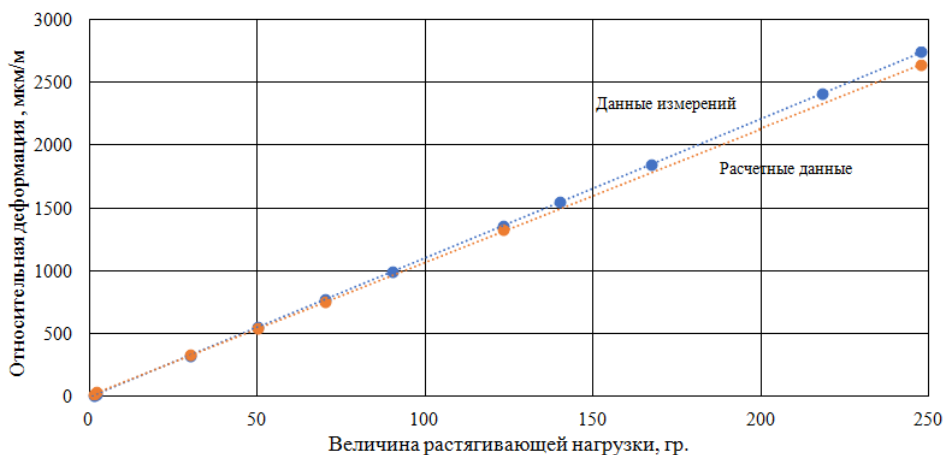


Рис. 7. График относительной деформации зонда с полимерным защитным покрытием в диапазоне 1,0...218,0 г

Для повышения чувствительности предложенной конструкции датчика возможно выполнить на конце зонда утолщение, например сферической формы, позволяющее добавить к силе вязкого трения, возникающего на цилиндрической поверхности зонда, силу вязкого отекания утолщения – силы Стокса.

Другой способ повышения чувствительности датчика заключается в использовании материала оптического волокна и защитной оболочки с более низкими модулями упругости, например оптического волокна на основе полимерных материалов. В любом случае применяемые материалы должны обеспечивать неизменность физико-

механических характеристик под воздействием силовых нагрузок в течение всего времени эксплуатации.

Направлением дальнейших исследований может быть повышение чувствительности датчика для измерения вязкости за счет создания «безкорпусного» зонда датчика на основе технологии нанесения на оптическое волокно защитных металлических покрытий методом напыления.

Использование чувствительных элементов на основе волоконно-оптических брегговских решеток обеспечивает полную пожаро-взрывобезопасность датчиков на их основе, а компактность предложенной конструкции позволяет размещать их в существующих полостях технологического оборудования, что делает привлекательным использование данных датчиков на взрывоопасных химических производствах. Так, к теме настоящей работы была проявлена заинтересованность ученых Пермского политехнического университета с целью исследования процессов полимеризации смесей высоковязких наполненных полимеров в процессе их технологической переработки.

Выводы

Проведено исследование, подтвердившее возможность создания датчика для устройства непрерывного измерения и контроля вязкости текучих сред в потоке в диапазоне от 20...6000 Па·с и более на основе волоконно-оптической брегговской решетки.

Предложены варианты конструкций чувствительного зонда датчика и изготовлены опытные образцы.

Проведены эксперименты опытного образца датчика с имитацией сил вязкого трения эталонными нагрузками, подтвердившие работоспособность конструкции.

Предложены направления дальнейших исследований для повышения чувствительности и точности измерений датчика.

По материалам работы над конструкцией устройства для измерения и контроля вязкости текучих сред подготовлена и подана заявка на изобретение.

Список литературы

1. Твердые топлива реактивных двигателей. Т. 1У: Топлива. Заряды. Двигатели / В.Н. Аликин, А.В. Вахрушев, В.Б. Голубчиков [и др.]. – М.: Машиностроение, 2011. – 380 с. – С. 50.

2. Пат. RU 2 537 524 МПК G01N 11/12. Способ определения вязкости и плотности жидкости и устройство для его осуществления.
3. Пат. SU 1286945 МПК G01N 11/00. Тензометрический датчик вязкости.
4. Пат. ПМ, RU 160404 МПК G01N 9/12. Устройство для непрерывного измерения вязкости жидкости.
5. Преобразователь вязкости жидкости Solartron 7827(29). – URL: https://solartron.nt-rt.ru/images/manual12s/SLT_TO/SLT_7827,29-TO.pdf.
6. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. – М.: Техносфера, 2008.
7. Тучин В.В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. – М.: Физматлит, 2010. – 488 с. – С. 289–305.
8. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1970. – С. 480–483.
9. Нормативно-технический паспорт на аэрозольный огнетушащий состав «Туман-3» / РНЦ «Прикладная Химия». – СПб., 2011.
10. Проектирование двигательных установок на твердых и пастообразных топливах / А.А. Авдиенко [и др.]. – Саратов: Изд-во СФ ВАУ, 2011. – С. 63.
11. Одиночная волоконная брэгговская решетка. – URL: ASTRO Fxxx, <https://i-sensor.ru/index.php/production/fbg/89-produktsiya/175-odinochnye-breggovskie-reshetki>.
12. Шишкин В.В., Гранев И.В., Шелемба И.С. Отечественный опыт производства и применения волоконно-оптических датчиков // Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3, № 1.
13. Бабин С.А., Власов А.А., Шелемба И.С. Волоконно-оптические сенсоры на основе брэгговских решеток // Химия высоких энергий. – 2008. – Т. 42, № 4. – С. 35–37.
14. Интеррогатор (стоечный анализатор сигналов ASTRO A31x). – URL: <https://i-sensor.ru/index.php/production/analizatory-signalov/stochnyj>.
15. Скворцова В.А., Шелемба И.С., Оглезнев А.А. Испытательный стенд для проверки волоконно-оптических систем термометрии распределенного типа в соответствии с международным стандартом качества ИЕС 61757-22:2016 // Фотон-Экспресс. – 2017. – № 6(142); спец. вып. Фотон-Экспресс-Наука 2017: материалы всерос. конф. по волокон. оптике; г. Пермь, 3–6 окт. 2017 г. – С. 236–237.

16. An interrogator for fiber Bragg sensor array based on the tunable erbium fiber laser / S.A. Babin, A.A. Vlasov, S.I. Kablukov, I.S. Shelemba // *Laser Physics*. – 2007. – Vol. 17, no. 11. – P. 1340–1344.

References

1. Solid fuel jet engines. Volume 1U. Fuel. Charges. Engines / V.N. Alikin, A.V. Vakhrushev, V. B. Golubchikov et al. M.: Engineering, 2011.380 s. p.50.

2. Patent RU 2,537,524 IPC G01N 11/12. A method for determining the viscosity and density of a liquid and a device for its implementation.

3. Patent SU 1286945 IPC G01N 11/00. Strain gauge viscosity.

4. Patent PM, RU 160404 IPC G01N 9/12. Device for continuous measurement of fluid viscosity.

5. Liquid viscosity transducer Solartron 7827(29)https://solartron.nt-rt.ru/images/manuals/SLT_TO/SLT_7827,29-TO.pdf.

6. UDD E. *Fiber Optic Sensors*. M.: Technosphere, 2008.

7. Tuchin V.V. *Lasers and fiber optics in biomedical research*. M.: Fizmatlit, 2010.488 s., P. 289-305.

8. Loytsyansky L.G. *Mechanics of fluid and gas*. M.: Nauka, 1970. p. 480-483.

9. Regulatory and technical passport for aerosol fire extinguishing composition “Tuman-3”, RSC “Applied Chemistry”, St. Petersburg.

10. Avdienko A.A. et al. Design of propulsion systems for solid and pasty fuels. Saratov. SF VAU, 2011. P. 63.

11. Single fiber Bragg grating ASTRO Fxxx. <https://i-sensor.ru/index.php/production/fbg/89-produktsiya/175-odinocnye-breggovskie-reshetki>.

12. Domestic experience in the production and application of fiber-optic sensors / V.V. Shishkin, I.V. Granev, I.S. Shelemba / *Applied Photonics-2016*. T. 3, № 1.

13. Babin C.A., Vlasov A.A., Shelemba I.S. Fiber-optic sensors based on Bragg gratings. *Chemistry of High Energies*, 2008, Volume 42, No. 4, p. 35-37.

14. Interrogator (rack-mount signal analyzer ASTRO A31x),<https://i-sensor.ru/index.php/production/analizatory-signalov/stochnyj>.

15. Test stand for testing fiber-optic thermometry systems of distributed type in accordance with the international quality standard IEC 61757-22:2016 /

V.A. Skvortsova, I.S. Shelemba, A.A. Ogleznev // Photon-Express. 2017. № 6(142): spec. vol. Photon-Express-Science 2017: Vseros. Conf. on request. optike, Perm, 3-6 Oct. 2017-Pp. 236-237. The RISC.

16. Babin S.A., Vlasov A.A., Kablukov S.I., Shelemba I.S. An interrogator for fiber Bragg sensor array based on the tunable erbium fiber laser. Laser Physics, 2007, v.17, N11, p.1340-1344.

Получено 11 марта 2020