

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТУРБИННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ РАСХОДА ОТ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА

О.В. Аралов

aralovov@niitnn.transneft.ru

И.В. Буянов

buyanoviv@niitnn.transneft.ru

ООО «НИИ Транснефть», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены основные результаты впервые проведенных экспериментальных исследований по оценке зависимости относительного отклонения коэффициентов преобразования турбинного преобразователя расхода $K_{\text{ТПР}}$ от физико-химических свойств нефти и нефтепродуктов, а также условий испытаний. Исследования проведены на специализированном калибровочном стенде и на трех системах измерения количества и показателей качества нефти и нефтепродуктов, эксплуатируемых в магистральном трубопроводном транспорте при различных климатических условиях. Для оценки влияния условий испытаний на $K_{\text{ТПР}}$ на основании полученных экспериментальных данных установлены корреляционные зависимости между кинематической вязкостью, плотностью, температурой и избыточным давлением. Выявлено, что наибольшее влияние на $K_{\text{ТПР}}$ оказывают кинематическая вязкость и плотность рабочей среды (нефть и нефтепродукты), а также число Рейнольдса Re . Показано, что при изменении объемного расхода и кинематической вязкости на одном объекте можно прогнозировать изменение $K_{\text{ТПР}}$ во всем диапазоне объемного расхода, основываясь на значениях Re . По результатам исследований установлено, что испытуемый турбинный преобразователь расхода DN 250-1,6 можно эксплуатировать при Re более 7600

Ключевые слова

Турбинный преобразователь расхода, вязкость, давление, плотность, температура, число Рейнольдса, коэффициент преобразования расхода

Поступила 20.08.2020

Принята 21.09.2020

© Автор(ы), 2021

Введение. Реологические свойства нефти и нефтепродуктов, обусловленные их сложным составом, оказывают влияние на транспортировку и измерение количества нефти и нефтепродуктов. Эффективность эксплуатации каждого конкретного трубопровода и применяемых средств измере-

ний зависит от того, насколько точно установлены природа, характер поведения и физико-химические свойства нефти и нефтепродуктов при конкретных условиях [1].

Настоящая статья посвящена исследованиям, выполненным в целях определения влияния рабочей среды на показания турбинного преобразователя расхода (ТПР). По своим техническим и метрологическим характеристикам расходомеры такого типа приобретают все большую популярность в нефтяных компаниях по всему миру для учета нефти и нефтепродуктов [2].

Турбинные преобразователи расхода предназначены для измерений расхода и объема нефти и нефтепродуктов при определенных значениях вязкости и представляют собой счетчики объема и работают по принципу счетчиков с крыльчаткой Вольдмана: регистрируют протекающий через поперечное сечение трубы объем жидкости, используя среднюю скорость потока. Поток жидкости, проходящей по трубопроводу, приводит во вращение ротор. Угловая скорость ротора, пропорциональная измеряемому расходу, преобразуется магнитоиндукционным генератором в пропорциональное значение частоты электрического напряжения. Датчик преобразует угол поворота зубчатого колеса в электрические сигналы [2]. Внешний вид ТПР приведен на рис. 1.

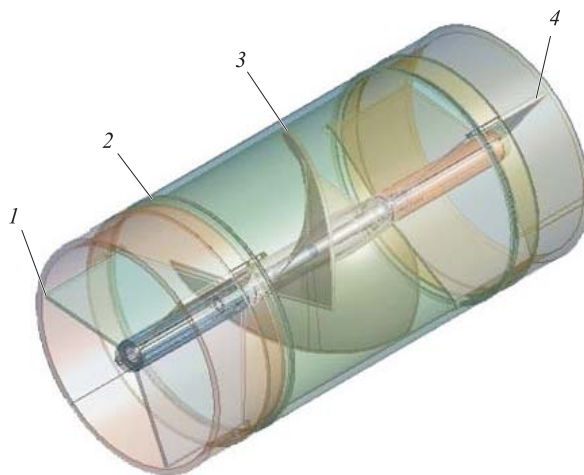


Рис. 1. Внешний вид ТПР:

1, 4 — входная и выходная крестовины; 2 — корпус; 3 — ротор

Турбинные преобразователи расхода, используемые при косвенном методе измерения массы нефти и нефтепродуктов, должны обеспечивать выдачу частотного выходного сигнала пропорционально числу импульсов.

Материалы и принятые допущения. Для определения взаимосвязи показаний ТПР со свойствами рабочей среды проведены испытания в различных условиях эксплуатации, а также выполнен анализ полученных результатов испытаний.

Испытаниям подвергся ТПР DN 250-1,6 на специализированном калибровочном стенде и на трех системах измерения количества и показателей качества нефти и нефтепродуктов (СИКН № 1, СИКН № 2 и СИКН № 3), задействованных непосредственно в технологическом процессе транспортировки нефти. Условия испытаний ТПР приведены в табл. 1.

Таблица 1

Условия испытаний ТПР

Параметр	Специализированный стенд (два типа масла — 1 и 2; дизельное топливо — ДТ)	СИКН № 1 (нефть)	СИКН № 2 (нефть)	СИКН № 3 (нефть)
Объемный расход, м ³ /ч	294,8–1776,0	384,8–1709,7	291,1–1705,7	286,9–1408,0
Кинематическая вязкость, мм ² /с	6,6–81,4	13,5–15,0	49,8–88,1	14,4–20,1
Плотность, кг/м ³	840,1–871,4	867,5–869,7	893,6–906,3	851,9–861,2
Температура, °С	16,5–44,3	21,1–23,6	8,0–9,9	2,6–4,1
Избыточное давление, МПа	0,21–0,49	0,35–0,79	0,22–0,36	0,97–1,29

Результаты. Анализ результатов испытаний и определение коэффициентов корреляции. Статистический анализ фактических значений, полученных по результатам проведенных испытаний, заключается в оценке зависимости относительного отклонения коэффициента преобразования ТПР $K_{ТПР}$ от физико-химических свойств нефти, нефтепродуктов и условий испытаний. Корреляционный анализ метрологических характеристик ТПР — это определение степени влияния физико-химических свойств нефти, нефтепродуктов и условий испытаний на $K_{ТПР}$.

В качестве основных физико-химических свойств нефти, нефтепродуктов и условий испытаний, изменение которых потенциально может повлечь за собой изменение $K_{ТПР}$ (влияющие факторы), рассматриваются вязкость, плотность, температура и избыточное давление рабочей среды [3–7].

Математической мерой корреляции двух случайных величин служит коэффициент корреляции r . Значение данного коэффициента может меняться в соответствии с неравенством [8, 9]

$$-1 \leq r \leq 1. \quad (1)$$

Интерпретация значений коэффициента корреляции и степени взаимосвязи между анализируемыми величинами определяется в соответствии с известными критериями.

Линейный коэффициент корреляции r_{XY} между двумя случайными величинами X и Y можно записать так:

$$r_{XY} = \frac{\text{cov}_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}, \quad (2)$$

где cov_{XY} — корреляционный момент (ковариация) между значениями двух случайных величин X и Y ; σ_X, σ_Y — стандартные (среднеквадратические) отклонения случайной величины.

Корреляционный момент (ковариация) cov_{XY} определяется по формуле

$$\text{cov}_{XY} = \sum (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y}), \quad (3)$$

где x_i, y_i — значения случайных величин; \bar{X}, \bar{Y} — математические ожидания (средние значения) случайных величин X и Y .

Стандартное отклонение случайной величины определяется как

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{n-1}}, \quad (4)$$

где n — число значений в выборке.

Для корректной оценки взаимосвязи между случайными значениями с применением корреляционного анализа необходимо обеспечить достаточный объем выборки значений. Число наблюдений должно не менее чем в 5–6 раз превышать число исследуемых факторов. Если число наблюдений превышает число факторов в десятки раз, то в действие вступает закон больших чисел, который обеспечивает взаимную компенсацию случайных колебаний.

Для оценки влияния условий испытаний $K_{ТПР}$ на рис. 2 приведены в графическом виде значения коэффициентов корреляции r в точке расхода $1700 \text{ м}^3/\text{ч}$.

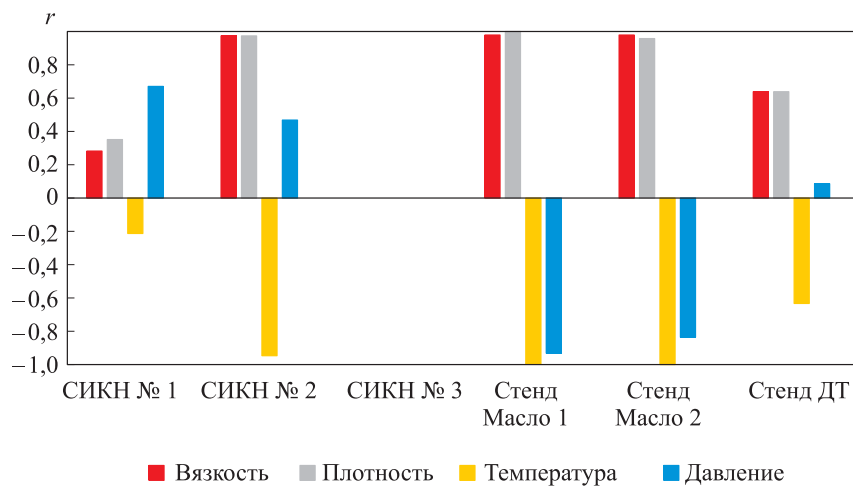


Рис. 2. Значения коэффициента корреляции r в точке расхода $1700 \text{ м}^3/\text{ч}$

Как следует из рис. 2, степень влияния кинематической вязкости, плотности, температуры, а также избыточного давления на $K_{\text{ТПР}}$ для разных объектов испытания различная. При этом имеется явно выраженная тенденция по разделению влияющих факторов на две группы:

- 1) температура и давление;
- 2) кинематическая вязкость и плотность.

Графическое представление значений $K_{\text{ТПР}}$, кинематической вязкости, плотности, температуры и избыточного давления также подтверждает выводы, полученные по результатам расчета коэффициента корреляции r . На рис. 2 видна определенная взаимосвязь между $K_{\text{ТПР}}$ и кинематической вязкостью, плотностью, температурой, избыточным давлением. Степень взаимосвязи кривых различается в зависимости от объекта испытаний.

Для оценки зависимости коэффициентов корреляции r во всем диапазоне объемного расхода проведен анализ зависимости коэффициента корреляции от кинематической вязкости, плотности, температуры и избыточного давления. На рис. 3 для большей наглядности построена графическая зависимость корреляции $K_{\text{ТПР}}$ с кинематической вязкостью от объемного расхода.

Результаты анализа значений коэффициента корреляции во всем испытуемом диапазоне показывают, что наибольшее влияние оказывают кинематическая вязкость и плотность рабочей среды.

Определение числа Рейнольдса. Кинематическая вязкость и плотность, как показали проведенные исследования, оказывают наибольшее

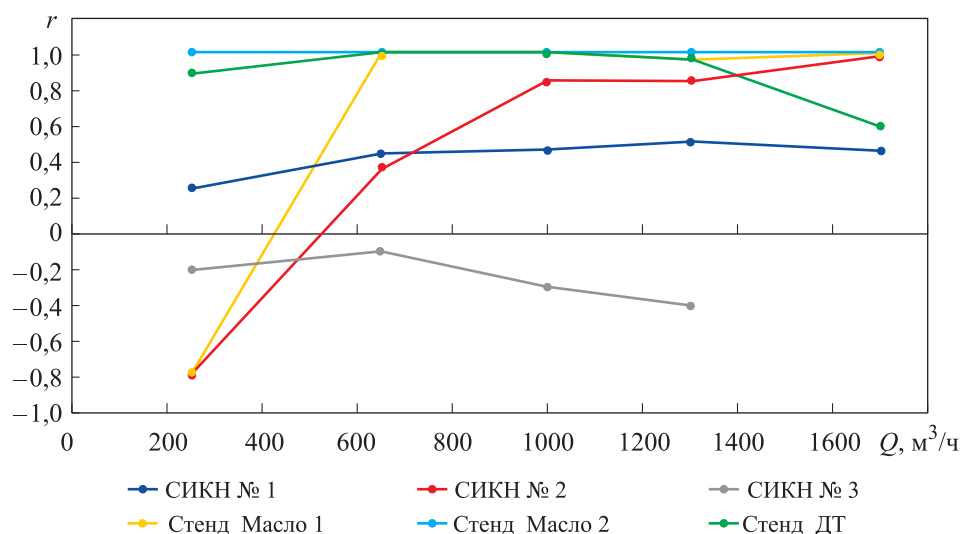


Рис. 3. Зависимость коэффициента корреляции K_{TTP} с кинематической вязкостью от объемного расхода

влияние на K_{TTP} во всех точках диапазона объемного расхода и одновременно являются составляющими Re . Для дальнейшего анализа зависимости изменения K_{TTP} от условий испытаний во всем диапазоне объемного расхода построены графики зависимости K_{TTP} от Re по каждому объекту.

Для визуальной оценки на основании данных, полученных при испытаниях на специализированном стенде, и данных СИКН (рис. 4 и 5) проведены расчеты и построены два графика зависимости K_{TTP} от Re . Число Рейнольдса рассчитывается по следующей формуле [10–14]:

$$Re = \frac{4Q}{v\pi D}; \quad (5)$$

$$v = \frac{\eta}{\rho}, \quad (6)$$

где Q — объемный расход; D — диаметр преобразователя; v — кинематическая вязкость; η — динамическая вязкость; ρ — плотность.

Из сравнения графиков, приведенных на рис. 4 и 5, выявлено, что градуировочная характеристика ТПР имеет отклонения при испытаниях в рамках одного объекта и смещение по осям X и Y градуировочной характеристики при испытаниях на разных объектах. Изменение K_{TTP} в рамках одного объекта обусловлено условиями испытаний (температурой, давлением, кинематической вязкостью и плотностью рабочей среды).

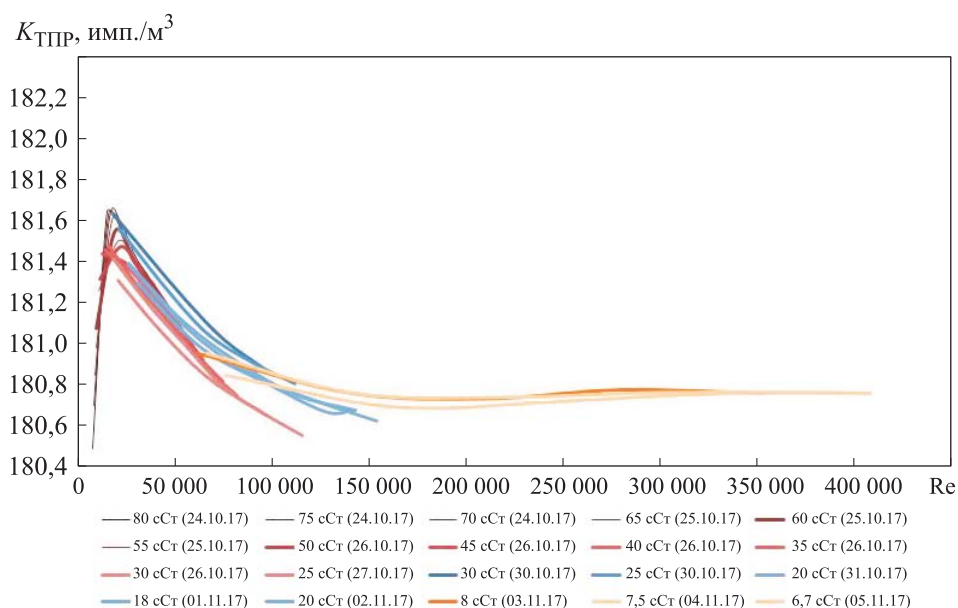


Рис. 4. Зависимость коэффициента преобразования ТПР от Re (испытания на калибровочном стенде)

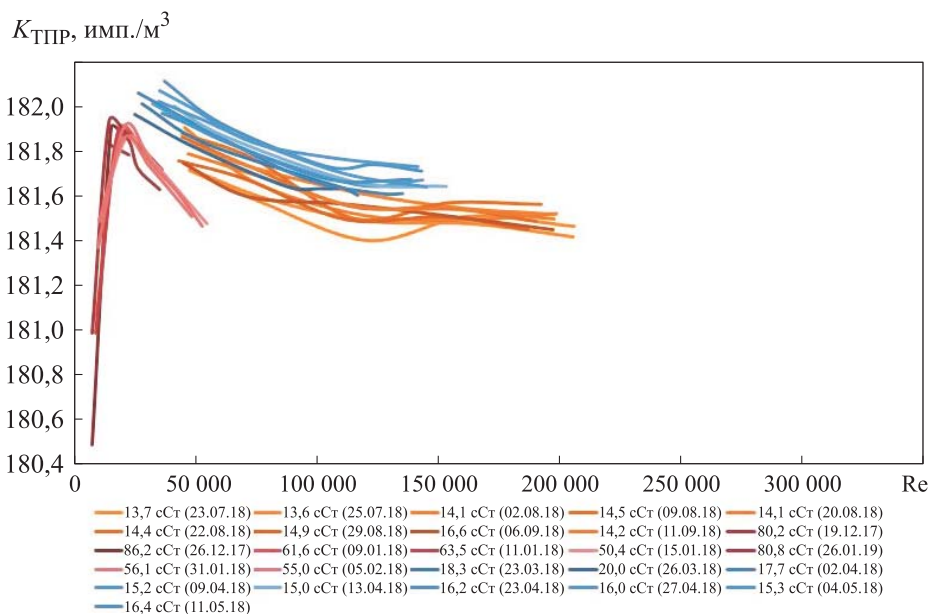


Рис. 5. Зависимость коэффициента преобразования ТПР от Re (испытания на СИКН)

Смещение $K_{ТПР}$ при испытаниях на разных объектах может быть обусловлено не только условиями испытаний, но и компоновкой измерительной линии (конфигурацией и длиной измерительной линии, филь-

трами-грязеуловителями), а также возможными вариантами установки струевыпрямительной секции ТПР. Работы по определению влияния на изменение $K_{ТПР}$ компоновки измерительной линии, правильности установки прокладок до и после ТПР, диаметра трубопровода и центрирования ТПР по оси являются предметом дальнейших исследований.

Для определения зависимости $K_{ТПР}$ от Re по каждому объекту построен график (рис. 6). Видно, что при разных значениях объемного расхода и кинематической вязкости имеются одинаковые значения Re .

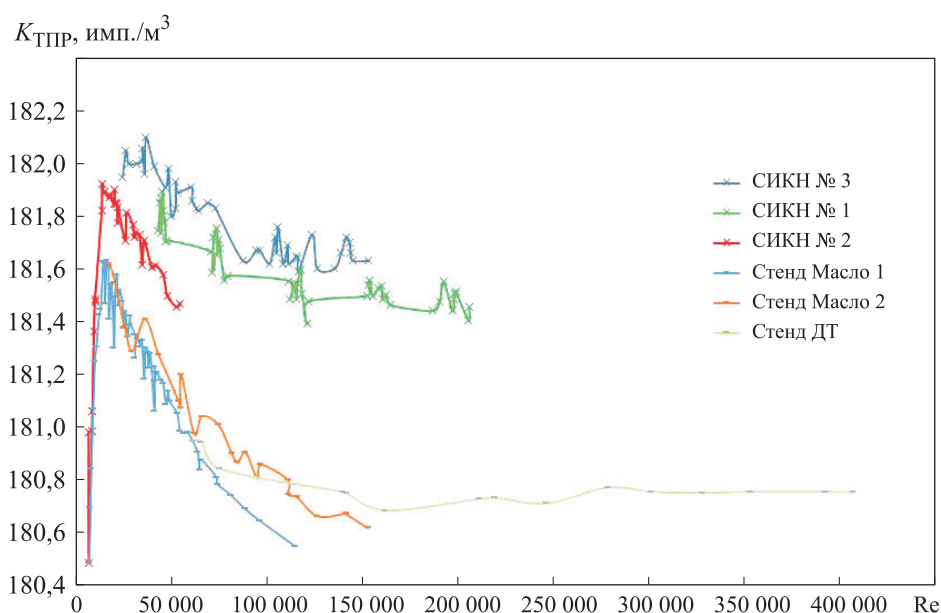


Рис. 6. Зависимость коэффициента преобразования ТПР от Re для разных объектов

По результатам испытаний на специализированном стенде получена градуировочная характеристика ТПР в широком диапазоне чисел Re при стабильных параметрах измерительной линии (смена рабочей среды проводилась без демонтажа ТПР) и при одинаковых значениях давления рабочей среды в точках диапазона объемного расхода.

Используя значения $K_{ТПР}$, полученные по результатам испытаний на калибровочном стенде, построим функцию, максимально близкую к множеству полученных результатов испытаний:

$$K_{ТПР} = \frac{2,41801}{0,103399 + \left(\frac{Re}{400000}\right)^{0,66202}} + \frac{-1,19364}{-0,108581 + \left(\frac{Re}{400000}\right)^{0,342762}} + \quad (7)$$

$$+ \frac{-0,930619}{0,154821 + \left(\frac{Re}{400000}\right)^{0,848118}} + \frac{-0,0520904}{0,0995582 + \left(\frac{Re}{400000}\right)^{3,43618}} + C, \quad (7)$$

где $K_{ТПР}$ — расчетный коэффициент преобразования ТПР DN 250-1,6; C — коэффициент смещения градуировочной характеристики для калибровочного стенда, $C = 180,76$ имп./м³.

Полученная с использованием математической функции градуировочная характеристика ТПР (зависимость $K_{ТПР}$ от Re) приведена на рис. 7 штриховой кривой голубого цвета. Штриховыми кривыми черного цвета показано относительное отклонение $\pm 0,15\%$ от построенной градуировочной характеристики [15]. Из рис. 7 следует, что при разных значениях кинематической вязкости и объемного расхода имеются одинаковые значения Re .

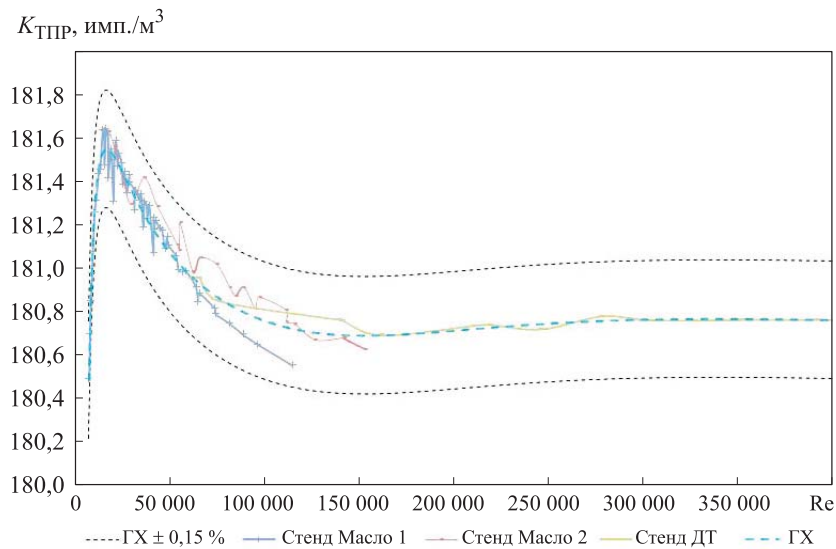


Рис. 7. Градуировочная характеристика ТПР (калибровочный стенд)

Результаты испытаний показали, что при разных условиях испытаний, но с одинаковым Re относительное отклонение $K_{ТПР}$ на одном объекте испытаний не превышает $\pm 0,15\%$.

Достоверность приведенного ранее подтверждают результаты испытаний (табл. 2). Из второго и третьего столбцов табл. 2 следует, что при испытаниях на разных значениях объемного расхода и кинематической вязкости, но при одинаковых Re (см. восьмой столбец), получены одинаковые значения $K_{ТПР}$ (см. седьмой столбец).

Результаты испытаний ТПР

Объемный расход, м ³ /ч	Кинематическая вязкость, сСт	Плотность, кг/м ³	Температура, °С	Давление, МПа	Потеря давления на ТПР, МПа	$K_{ТПР}$, имп./м ³	Re	Место испытаний
Re ~ 47 000								
384,8	13,5	867,6	23,22	0,55	0,00	181,719	46671,87	СИКН
1631,7	56,7	895,3	9,10	0,31	0,20	181,505	47120,63	СИКН
461,8	16,4	858,8	2,91	1,06	0,02	181,920	46106,69	СИКН
Re ~ 34 000								
652,5	30,7	858,4	39,06	0,46	0,03	181,188	34803,48	Стенд
649,7	30,1	862,8	16,73	0,46	0,03	181,416	35343,29	Стенд

Все приведенное указывает на то, что при изменении объемного расхода и кинематической вязкости на одном объекте можно спрогнозировать изменение $K_{ТПР}$ во всем диапазоне объемного расхода, основываясь на значениях Re.

На рис. 7 видно, что при реализации градуировочной характеристики ТПР в виде зависимости $K_{ТПР}$ от Re относительное отклонение $K_{ТПР}$ при испытаниях на калибровочном стенде находится в пределах $\pm 0,15\%$ во всем диапазоне изменения кинематической вязкости от 6,6 до 81,4 сСт.

Для определения влияния условий испытаний на изменение $K_{ТПР}$ в рамках одного объекта и причин смещения градуировочной характеристики при испытаниях на разных объектах по формуле (2) рассчитаны корреляционные соотношения $K_{ТПР}$ и кинематической вязкости, плотности, температуры и избыточного давления.

В соответствии с рис. 6 коэффициент $K_{ТПР}$ независимо от объекта испытаний и рабочей среды возрастает при увеличении Re до 14 000, затем $K_{ТПР}$ уменьшается и при Re более ~ 140 000 зависимость становится прямой с небольшим возрастающим уклоном.

Проведенные расчеты показывают, что наибольшее влияние на $K_{ТПР}$ оказывает Re, температура и давление. Плотность и кинематическая вязкость влияют в меньшей степени, поскольку данные величины являются составляющими Re и влияние их учтено в зависимости $K_{ТПР}$ от Re.

Анализ градуировочных характеристик, полученных на разных объектах испытаний (см. рис. 6), и расчетов показывает, что нижний предел диа-

пазона измерений объемного расхода ТПР зависит от кинематической вязкости рабочей среды, объемного расхода и объекта эксплуатации (происходит смещение градуировочной характеристики при смене объекта).

При наличии информации о градуировочной характеристике ТПР у организации, эксплуатирующей СИКН, можно определить нижний предел диапазона измерений объемного расхода ТПР на любом объекте эксплуатации, на основании результатов определения $K_{ТПР}$ и в точках объемного расхода на текущем значении кинематической вязкости.

Заключение. Отклонение $K_{ТПР}$ в период испытаний не превышало $\pm 0,15\%$, кроме диапазона объемного расхода $298,1 \dots 1776,0 \text{ м}^3/\text{ч}$ и диапазонов кинематической вязкости $13,5 \dots 88,1 \text{ сСт}$ (испытания на всех СИКН) и $6,6 \dots 80,0 \text{ сСт}$ (испытания на специализированном калибровочном стенде).

Кинематическая вязкость, плотность, температура и избыточное давление влияют на $K_{ТПР}$ (высокая корреляция). Отметим явно выраженную тенденцию по распределению влияющих факторов на две группы: 1) температура и давление; 2) кинематическая вязкость и плотность.

При различных условиях испытаний на одном объекте, но с одинаковым Re относительное отклонение $K_{ТПР}$ не превышает $\pm 0,15\%$.

Возможно прогнозировать изменения $K_{ТПР}$ во всем диапазоне объемного расхода, основываясь на значениях Re , полученных в ходе испытаний с различным объемным расходом и кинематической вязкостью на одном объекте.

Нижний предел диапазона измерений объемного расхода ТПР зависит от кинематической вязкости рабочей среды, объемного расхода и объекта испытаний. Можно определить нижний предел диапазона измерений объемного расхода ТПР на любом объекте эксплуатации на основании результатов определения $K_{ТПР}$ в точках объемного расхода при текущем значении кинематической вязкости. По результатам расчетов установлено, что испытуемый ТПР DN 250-1,6 может эксплуатироваться при $Re > 7600$.

Для подтверждения достоверности и возможности применения в системе обработки информации СИКН градуировочной характеристики ТПР в виде зависимости $K_{ТПР}$ от Re будут продолжены исследования и разработана методика определения градуировочных характеристик ТПР в зависимости от Re .

ЛИТЕРАТУРА

[1] Проскуряков Р.М., Матвийчук Н.В., Родионова Д.А. Принципиальные проблемы при проектировании автоматических систем измерения в нефтепро-

водах и пути их решения. *Международный научно-исследовательский журнал*, 2016, № 12-3, с. 168–171. DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.54.026>

[2] Аралов О.В., Буянов И.В., Воробьев С.И. и др. Современное состояние ведения учетных операций с нефтью и нефтепродуктами с применением измерительных систем в России. М., Недра, 2019.

[3] Панченков Г.М. Теория вязкости жидкости. М., Гостоптехиздат, 1947.

[4] Аралов О.В., Буянов И.В., Саванин А.С. и др. Исследование методов расчета кинематической вязкости нефти в магистральном нефтепроводе. *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*, 2017, т. 7, № 5, с. 97–105.

[5] Ташбулатов Р.Р., Мастобаев Б.Н., Каримов Р.М. и др. Анализ изменения вязкостно-температурной зависимости бинарной нефтяной смеси. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*, 2018, № 2, с. 5–9.
DOI: <https://doi.org/10.24411/0131-4270-2018-10201>

[6] Severa L., Havlicek M., Kumbar V. Temperature dependent kinematic viscosity of different types of engine oils. *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.*, 2009, vol. 57, pp. 95–102. DOI: <https://doi.org/10.11118/actaun200957040095>

[7] Gheshlaghi B.K., Dehghani M.R., Parhizgar H. Prediction kinematic viscosity of petroleum fractions using artificial neural networks. *IJOGST*, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 51–65.

[8] Вентцель Е.С. Теория вероятности. М., Наука, 1969.

[9] Елисеева И.И., Юзбашев М.М. Общая теория статистики. М., Финансы и статистика, 2004.

[10] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М., ФИЗМАТЛИТ, 2001.

[11] Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М., Дрофа, 2003.

[12] Павловский В.А., Чистов Л.А., Кучинский Д.М. Моделирование течений в трубах. *Вестник СПбГУ. Прикладная математика. Информатика*, 2019, т. 15, № 1, с. 93–105. DOI: <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2019.107>

[13] Jimenez J. Turbulent flows over rough walls. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2004, no. 36, pp. 173–196. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122103>

[14] Нестеров В.Н., Андреев И.П. Повышение точности турбинных преобразователей расхода с помощью метода обобщенных влияющих величин. *Измерительная техника*, 2017, № 4, с. 22–26.

[15] Абдуллин И.А., Лаптев Н.И., Зорин Ю.В. и др. Экспериментальные исследования измерительного канала информационно-измерительной системы, реализованной на основе турбинного преобразователя расхода нефти. *Вестник Казанского технологического университета*, 2010, № 12, с. 496–501.

Аралов Олег Васильевич — д-р техн. наук, директор Центра оценки соответствия продукции, метрологии и автоматизации производственных процессов ООО «НИИ Транснефть» (Российская Федерация, 117186, Москва, Севастопольский пр-т, д. 47А).

Буянов Иван Владимирович — канд. техн. наук, заместитель директора Центра оценки соответствия продукции, метрологии и автоматизации производственных процессов ООО «НИИ Транснефть» (Российская Федерация, 117186, Москва, Севастопольский пр-т, д. 47А).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Аралов О.В., Буянов И.В. Основные результаты исследований зависимости коэффициентов преобразования турбинного преобразователя расхода от числа Рейнольдса. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2021, № 2 (137), с. 28–42. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-2-28-42>

KEY RESEARCH INSIGHTS INTO DEPENDENCE BETWEEN TURBINE FLOW TRANSDUCER CONVERSION COEFFICIENTS AND REYNOLDS NUMBER

O.V. Aralov
I.V. Buyanov

aralovov@niitnn.transneft.ru
buyanoviv@niitnn.transneft.ru

LLC Transneft R&D, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper focuses on the key findings of the first experimental studies on assessing the dependence of the relative deviation of the conversion coefficients of the turbine flow transducer K_{TFT} on the physicochemical properties of oil and oil products, as well as test conditions. The studies were carried out on a specialized calibration stand and on three systems for measuring the quantity and quality indicators of oil / oil products, operated in the main pipeline transport under various climatic conditions. Relying on the obtained experimental data, we assessed the influence of test conditions on K_{TFT} and established correlation dependences between the kinematic viscosity, density, temperature and excess pressure. The study shows that the kinematic viscosity and density of the working medium, i.e., oil / oil products, as well as the Reynolds number Re , have the greatest influence on K_{TFT} . Furthermore, with a change in the volumetric flow rate and kinematic viscosity at one object, it is possible to predict the change in K_{TFT} in the entire range of the volumetric flow rate, relying on Re values. Findings of research show that the tested turbine flow transducer DN 250-1.6 can be operated when $Re > 7600$

Keywords

Turbine flow transducer, viscosity, pressure, density, temperature, Reynolds number, flow conversion coefficient

Received 20.08.2020

Accepted 21.09.2020

© Author(s), 2021

REFERENCES

- [1] Proskuryakov R.M., Matviychuk N.V., Rodionova D.A. Conceptual problems of automatic measurement system on oil pipeline and the ways of its solution. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2016, no. 12-3, pp. 168–171 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.54.026>
- [2] Aralov O.V., Buyanov I.V., Vorob'ev S.I., et al. *Sovremennoe sostoyanie vedeniya uchetykh operatsiy s nef'yu i nefteproduktami s primeneniem izmeritel'nykh sistem v Rossii* [Current state of conducting registration operations with oil and oil products using measuring systems in Russia]. Moscow, Nedra Publ., 2019.
- [3] Panchenkov G.M. *Teoriya vyazkosti zhidkosti* [Theory of liquid viscosity]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1947.
- [4] Aralov O.V., Buyanov I.V., Savanin A.S., et al. Research of methods for oil kinematic viscosity calculation in the oil-trunk pipeline. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nef'ti i nefteproduktov* [Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation], 2017, vol. 7, no. 5, pp. 97–105 (in Russ.).
- [5] Tashbulatov R.R., Mastobaev B.N., Karimov R.M., et al. Analysis of changing viscosity-temperature dependence in binary mixture of oils. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya* [Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons], 2018, no. 2, pp. 5–9 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/0131-4270-2018-10201>
- [6] Severa L., Havlicek M., Kumbar V. Temperature dependent kinematic viscosity of different types of engine oils. *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.*, 2009, vol. 57, pp. 95–102. DOI: <https://doi.org/10.11118/actaun200957040095>
- [7] Gheshlaghi B.K., Dehghani M.R., Parhizgar H. Prediction kinematic viscosity of petroleum fractions using artificial neural networks. *IJOGST*, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 51–65.
- [8] Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnosti* [Probability theory]. Moscow, Nauka Publ., 1969.
- [9] Eliseeva I.I., Yuzbashev M.M. *Obshchaya teoriya statistiki* [General theory of statistics]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2004.
- [10] Landau L.D., Lifshits E.M. *Gidrodinamika* [Hydrodynamics]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2001.
- [11] Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid mechanics]. Moscow, Drofa Publ., 2003.
- [12] Pavlovskiy V.A., Chistov L.A., Kuchinskiy D.M. Modeling of pipe flows. *Vestnik SPbGU. Prikladnaya matematika. Informatika* [Vestnik of St. Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science], 2019, vol. 15, no. 1, pp. 93–105 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2019.107>
- [13] Jimenez J. Turbulent flows over rough walls. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2004, no. 36, pp. 173–196. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122103>
- [14] Nesterov V.N., Andreev I.P. Increasing the accuracy of turbine flow transducers using the method of generalized influence variables. *Meas. Tech.*, 2017, vol. 60, no. 4, pp. 336–342. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1198-z>

[15] Abdullin I.A., Laptev N.I., Zorin Yu.V., et al. Experimental study on measuring channel of information measuring system based on turbine oil flow converter. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2010, no. 12, pp. 496–501 (in Russ.).

Aralov O.V. — Dr. Sc. (Eng.), Director of the Center for Product Conformity Assessment, Metrology and Automation of Production Processes, LLC Transneft R&D (Sevastopolskiy prospekt 47A, Moscow, 117186 Russian Federation).

Buyanov I.V. — Cand. Sc. (Eng.), Deputy Director of the Center for Product Conformity Assessment, Metrology and Automation of Production Processes, LLC Transneft R&D (Sevastopolskiy prospekt 47A, Moscow, 117186 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Aralov O.V., Buyanov I.V. Key research insights into dependence between turbine flow transducer conversion coefficients and Reynolds number. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2021, no. 2 (137), pp. 28–42 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-2-28-42>