

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ НОВОГО МЕТОДА И СОЗДАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ КОМБИНИРОВАННОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

УДК 621.9.047/048

С.В. Пахтусов, ООО «Газпром трансгаз Саратов» (Саратов, РФ)

М.В. Аврамов, к. т. н., ООО «Газпром трансгаз Саратов»,
 avramov-mv@utg.gazprom.ru

Н.В. Бекренев, д. т. н., проф., Саратовский государственный
 технический университет (СГТУ) им. Ю.А. Гагарина (Саратов, РФ),
 nikolaj.bekrenev@yandex.ru

Проанализирована техническая проблема обеспечения ресурса деталей систем транспортировки природного газа, связанная со снижением пропускной способности вследствие их загрязнения в процессе эксплуатации. Снижение расхода газа через горелочное устройство приводит к падению мощности агрегата и увеличению выбросов в атмосферу соединений классов CO и NO_x. Подтверждена актуальность разработки методов очистки горелочных устройств, не выработавших паспортный ресурс. Констатировано, что метод ультразвуковой очистки в классическом применении имеет ограничения по качеству удаления загрязнений из внутренних полостей и каналов, в которых интенсивность кавитационных процессов снижается. Предложен и экспериментально подтвержден метод повышения эффективности ультразвуковой очистки указанных поверхностей путем сообщения изделию ультразвуковых колебаний непосредственно в зоне локализации загрязнений. При помощи компьютерного моделирования определены рациональная схема и диапазон частот ультразвукового воздействия. Выполнены экспериментальные исследования существующей и предложенной схем очистки с контролем изменения пропускной способности по расходу сжатого воздуха через каналы при помощи специального стенда и путем пролива водой заданного объема. Доказано восстановление пропускной способности горелочных устройств, не выработавших паспортный ресурс ГПА до 97–100 % в сравнении с «эталонными» (новыми). Показано, что предлагаемая схема наиболее эффективна для удаления значительных по объему и адгезионно-прочных загрязнений. Экспериментально уточнены технологические режимы. Разработан и изготовлен экспериментальный образец автоматизированной установки, производственные испытания которого доказали эффективность предложенного метода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА, РЕСУРС, ОТЛОЖЕНИЯ, ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ, УЛЬТРАЗВУК, КАВИТАЦИЯ, ОЧИСТКА, АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА, КОНТРОЛЬ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ.

Опыт эксплуатации некоторых типов горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на компрессорных станциях (КС) выявил особенности применения данных систем. В ходе эксплуатации по различным причинам выявляется нарушение требуемых параметров горения газозвушной смеси, что связано с отложе-

нием соединений сопутствующих горючему газу элементов на стенках каналов и отверстий (рис. 1). Это вызывает повышенное газодинамическое сопротивление, что приводит к снижению фактической мощности ГПА, а также к повышенному содержанию соединений CO и NO_x, что сказывается отрицательно на экологических

показателях агрегата. В конечном счете отмеченные отклонения в работе горелочных устройств нарушают нормальную работу ГПА, вызывают необходимость увеличения расхода топливного газа для поддержания заданного режима и сохранения мощности агрегата. Отмеченные нарушения проявляются задолго до выра-

ботки горелочным устройством паспортного ресурса, что вызывает необходимость его замены и, как следствие, дополнительные финансовые расходы.

Восстановить работоспособность горелочных устройств можно путем очистки загрязненных каналов. Среди известных методов очистки наиболее эффективным является ультразвуковой (УЗ), основанный на эффекте акустической кавитации, что следует из сравнения количества загрязнений, остающихся на поверхности изделия после очистки различными методами [1]:

- струйная очистка, промывка, ополаскивание – 85 %;
- очистка в бензине – 70 %;
- очистка в парах хлорированных растворителей – 65 %;
- вибрационная очистка – 56 %;
- кипячение в воде – 45 %;
- ручная очистка металлическими щетками – 10 %;
- УЗ-очистка – менее 2 %.

Принцип УЗ-очистки основан на механическом действии УЗ-волн на загрязнения, находящиеся на поверхности деталей. При распространении УЗ-волн в полупериод растяжения колеблющегося тела в водном растворе возникают заполненные парами жидкости и растворенными в ней воздухом и другими газами пузырьки, а в последующий полупериод сжатия колеблющегося тела они захлопываются. Явление образования и захлопывания пузырьков в жидкости, сопровождающееся сильными гидравлическими ударами в местах захлопывания пузырьков, называется кавитацией. Ударная волна передает жидкости (на микроучастке захлопывания пузырька) огромное ускорение. При этом возникают высокое давление и мгновенная температура в несколько тысяч градусов. Чем большее ускорение приобретает жидкость, тем большей силой, способной совершать работу, обладает масса этой жидкости. Поскольку таких пузырьков образуется до нескольких миллионов в

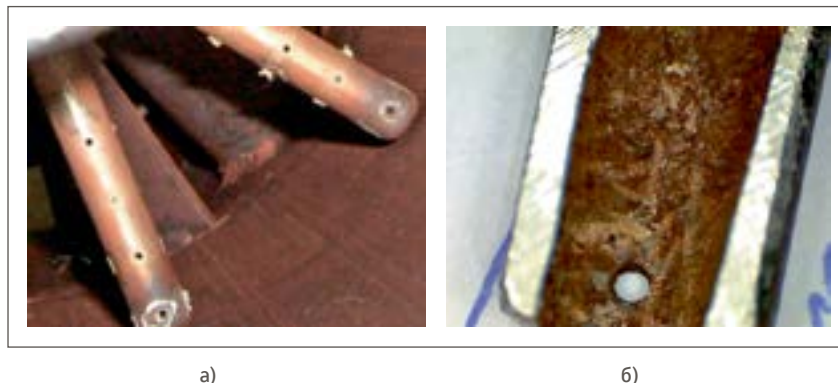


Рис. 1. Отложения загрязнений:
 а) на кромках выходных отверстий; б) на стенках каналов газоотводящих трубок

секунду, возникает кавитационная область, где действие указанных факторов весьма значительно. Захлопывание кавитационных разрывов вызывает образование ударных волн, которые создают в ближайшей зоне давления, в 100 раз превышающие первичное давление акустического поля.

Под действием этой силы связь загрязнения с поверхностью детали, помещенной в жидкость, нарушается почти мгновенно, усиливаются эффекты Ребиндера, и загрязнение отделяется от поверхности. Механические усилия, развивающиеся при возникновении кавитации, не только удаляют с поверхности жировые загрязнения, но могут разрушать также оксидные пленки, например удалять окалину со стальных изделий [2].

С учетом сложности конструкции горелочного устройства, характеризующегося наличием «теневых» зон для распространения волн, изложенные особенности УЗ-кавитации позволяют предположить, что обычная схема очистки даже при высокой интенсивности УЗ-поля обеспечит удаление загрязнений только с внешних поверхностей деталей. В закрытых полостях и каналах вследствие гашения акустических волн интенсивность кавитации будет резко падать, что снизит эффективность очистки.

В авиационном приборо- и агрегатостроении для очистки отверстий используются специ-

альные системы в виде трубчатых (игольчатых) излучателей изгибных колебаний с прокачкой жидкости через канал [2]. Однако их применение для решения имеющейся проблемы очистки каналов в изделиях указанного типа нецелесообразно по причине высокой трудоемкости отдельной очистки большого числа отверстий и их труднодоступности, а также малого диаметра отверстий, что практически делает невозможным применение таких трубчатых инструментов.

ООО «Газпром трансгаз Саратов» совместно с СГТУ им. Ю.А. Гагарина были проведены исследования, позволившие обосновать новый метод УЗ-очистки загрязненных труднодоступных мест горелочных устройств различных типов ГПА, разработать и внедрить технологию и автоматизированную УЗ-установку, обеспечивающие эффективное восстановление пропускной способности горелочных устройств.

Целью исследований стало повышение эффективности УЗ-очистки закрытых полостей и каналов малого диаметра в деталях машиностроения типа горелочных устройств ГПА на основе обоснования технологии, включающей сочетание общего кавитационного и местного контактного вибровоздействия с учетом собственных резонансных частот изделия. Таким образом, предлагается воздействовать на корпус горелочного устройства

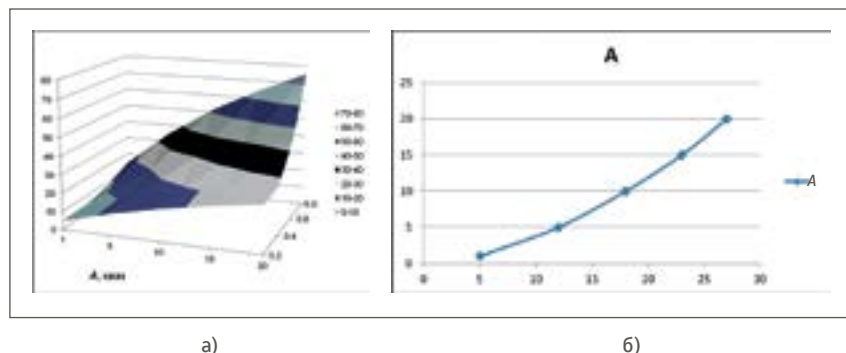


Рис. 2. Изгибные напряжения σ_F :
 а) в трубчатой конструкции, подвергнутой воздействию ультразвука, в зависимости от амплитуды A и соотношения диаметра канала и внутреннего диаметра поверхности загрязнений c ; б) соответствующие напряжениям средние значения амплитуды УЗ-колебаний

УЗ-колебаниями излучателя наряду с акустической кавитацией.

Авторами выполнен анализ существующего метода УЗ-кавитационной очистки и предлагаемого метода контактной очистки с учетом скрытого характера загрязнений при допущении, что причиной разрушения последних являются внутренние напряжения, возникающие под действием кавитации и, соответственно, изгибных высокочастотных колебаний очищаемой поверхности.

Условие разрушения слоя внутренних загрязнений может быть записано следующим образом:

$$\sigma_F \geq [\sigma]_{\text{адг}}, \quad (1)$$

где σ_F – изгибные напряжения, вызванные УЗ-колебаниями; $[\sigma]_{\text{адг}}$ – адгезионная прочность (прочность сцепления) слоя загрязнений с очищаемой поверхностью.

Изгибные напряжения согласно известным выражениям сопротивления материалов [2] определяются по выражению:

$$\sigma_F = \frac{M}{W}, \quad (2)$$

где M – изгибающий момент; W – момент сопротивления сечения изгибающегося элемента.

Представим слой загрязнений в канале в виде покрытия, имеющего определенную адгезию с поверхностью канала. Примем для покрытия форму трубки дли-

ной, равной рассматриваемому элементу конструкции. Для кольцевого сечения слоя покрытия момент сопротивления равен [2]:

$$W = 0,1D^3(1 - c^4), \quad (3)$$

где D – диаметр отверстия канала в очищаемом изделии; $c = d/D$, d – внутренний диаметр слоя загрязнений на поверхности канала.

Изгибающий момент, вызванный динамической силой вследствие контакта элемента конструкции с колеблющимся с УЗ-частотой волноводом:

$$M = P_d l = CA^{0,56}l, \quad (4)$$

где P_d – величина динамической силы, взято по зависимости, полученной А.И. Марковым [3]; l – длина очищаемого элемента конструкции; C – эмпирический коэффициент динамической силы ультразвука; A – амплитуда УЗ-колебаний.

Подставив (2) и (3) в (1), получим выражение для определения внутренних напряжений изгиба в слое загрязнений, связывающее величину напряжений с амплитудой УЗ-колебаний и конструктивными особенностями очищаемого объекта:

$$\sigma_F = \frac{CA^{0,56}l}{0,1D^3(1 - c^4)}, \quad (5)$$

С учетом многоциклового характера нагружений элемента

конструкции изгибные напряжения необходимо определять с учетом эквивалентного N_3 и базового N_b циклов его нагружения по известной зависимости [2]:

$$\sigma_{F3} = \sigma_F \sqrt[m]{\frac{N_b}{N_3}}, \quad (6)$$

где $m = 8$ – показатель степени; $N_b = 10^7 - 10^8$ – рекомендуемые [2] значения базового числа циклов нагружения машиностроительных конструкций, при превышении которого возможно разрушение объекта.

Примем эквивалентное число циклов нагружений равным частоте УЗ-колебаний вынуждающей силы, т. е. волновода $N_3 = f$. С учетом этого, подставив (5) в (6), можно переписать (1) следующим образом:

$$\frac{CA^{0,56}l}{0,1D^3(1 - c^4)} \sqrt[m]{\frac{N_b}{f}} \geq [\sigma]_{\text{адг}}.$$

Из данного соотношения можно получить выражение для определения амплитуды и частоты УЗ-колебаний, сообщаемых изделию для обеспечения отделения слоя загрязнений от поверхности очищаемого канала:

$$A \geq \frac{\{0,1[\sigma]_{\text{адг}} D^3(1 - c^4)\}^{1,78}}{(Cl)^{1,78} \left(\frac{N_b}{f}\right)}. \quad (7)$$

По данным [3], принимая материал загрязнений преимущественно хрупким, можно принять $C = 16,6$. Расчетом по зависимости (5), принимая стандартное значение $f = 22$ кГц, получены графики (рис. 2), позволившие установить диапазон параметров эффективной контактной очистки с учетом адгезионной прочности загрязнений $[\sigma]_{\text{адг}} = 12-15$ МПа (максимальные значения по априорной информации).

Анализ графика позволяет определить амплитуду колебаний в случае каналов относительно большего диаметра в 10 мкм и в случае каналов меньшего ди-

аметра – 1–2 мкм. При этом считали толщину слоя загрязнений постоянной.

Примем величину базового цикла нагружений $N_b = 10^7$, тогда период времени до преодоления предела выносливости слоя загрязнений (величины адгезии) при стандартной частоте ультразвука будет равен

$$t = \frac{N_b}{f} = \frac{10^7}{22 \cdot 10^3} = 454,5 \text{ с,}$$

что составляет примерно 7 мин.

На основе изложенного механизм разрушения отложений путем контактного воздействия энергии ультразвука может быть предложен следующий. На элементы корпуса горелочного устройства будет действовать высокочастотная динамическая сила, вызывающая знакопеременные микродеформации изгиба, распространяющиеся в виде поверхностной волны, которая будет передаваться слоям загрязнений. Формы колебаний и величина соответствующих им деформаций определены путем компьютерного моделирования в программной среде APM WinMachine [4]. Моделирование позволило выявить рациональные частоты вибровоздействия, позволяющие обеспечить интенсивные деформации в зонах локализации загрязнений. В отложениях загрязнений в местах пучностей колебаний возникают внутренние нормальные и касательные напряжения, превышающие значения адгезии загрязнений к поверхности канала (полости) и когезии их структурных составляющих. В результате в слое загрязнения возникают трещины, и он отслаивается от поверхности канала и распадается на фрагменты, которые выносятся акустическими течениями. Вследствие частоты воздействия 20–22 кГц базовое число нагружений, принимаемое в большинстве механических систем равным 10^7 – 10^9 , может быть достигнуто за несколько минут, что будет соот-

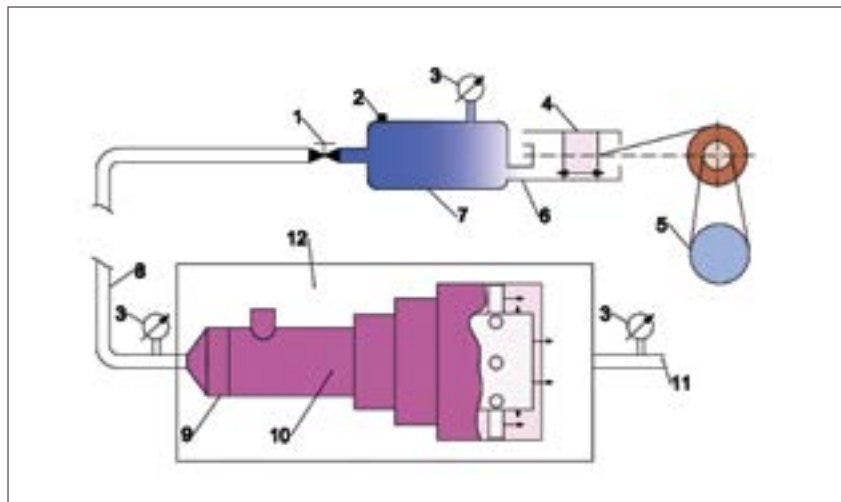


Рис. 3. Схема контрольного пневматического стенда:

1 – шаровый кран; 2 – предохранительный клапан; 3 – показывающий прибор; 4 – поршневой компрессор; 5 – привод компрессора; 6 – нагнетательный трубопровод; 7 – ресивер; 8 – трубопровод; 9 – коммутирующее устройство; 10 – контролируемое горелочное устройство; 11 – выпускной трубопровод; 12 – герметично закрываемый баллон $\Delta T, \%$

ветствовать времени отслоения от основы и разрушения слоя загрязнений.

Вследствие малой интенсивности кавитации в «затененных» корпусом детали зонах ее влияние может быть малозначительным.

В ходе экспериментальной проверки предложенного метода [5, 6] очистка горелочных устройств осуществлялась по следующим схемам:

- обычная (общая) очистка на частоте, обеспечивающей интенсивную кавитацию (23,5–23,6 кГц);
- комбинированная очистка (общая и путем введения газоотводящих трубок горелочного устройства в жесткий контакт с торцевой поверхностью УЗ-волновода) на частоте, обеспечивающей интенсивную кавитацию (23,5–23,6 кГц);
- комбинированная очистка на частоте 22,3 кГц, соответствующей максимальному виброускорению при минимальных шумовых характеристиках процесса [5].

Обрабатывалось по три горелочных устройства в каждом режиме. Контроль степени очистки осуществлялся по расходу воздуха через каналы горелочного устройства при помощи специ-

ального стенда, изготовленного в ООО «Газпром трансгаз Саратов» (рис. 3). По результатам экспериментов получены графики, представленные на рис. 4.

Из графиков видно, что при использовании комбинированной очистки на докавитационной частоте (C_3) происходит интенсивное удаление загрязнений в первую минуту обработки, далее зависимость делается пологой.

Возможно, здесь играет важную роль сообщение высокочастотных вибраций непосредственно очищаемым поверхностям и проявление пучности амплитуды смещения непосредственно в данной зоне, что вызывает отрыв загрязнений от внутренних шероховатостей и заусенцев, оставшихся после механической обработки при изготовлении горелочного устройства. Также частично возможно разрушение заусенцев.

УЗ-колебания, передаваемые жидкости во внутренней полости газоотводящих трубок и сопряженные зоны через корпус, вызывают акустические течения, вымывающие отделившиеся загрязнения из зоны обработки. В целом в первую минуту очистки эффективность данного режима

практически в 6 раз превышает такую для обычной технологической схемы. После 5 мин обработки суммарная эффективность снижается и превышает достигаемую при обычной схеме только в 1,4 раза. Однако уже после 3 мин обработки по предлагаемой схеме пропускная способность изделия отличается от эталонной (для не эксплуатировавшегося горелочного устройства) не более чем на 3 % (97 % от эталонной), что делает нецелесообразной последующую обработку.

Обычная схема (C_1) за то же время обеспечивает восстановление пропускной способности только на 44 %. Это может быть связано с расположением загрязнений в каналах диаметром 3–4 мм в газотводящих трубках, размещенных внутри кольцевой оболочки, что препятствует развитию кавитационных процессов (барьерный эффект стенок трубок и оболочки) и снижает их влияние на разрушение загрязнений. Слабые по указанной причине акустические течения также не способствуют эвакуации продуктов разрушения загрязнений (шлама). Экстраполяция графика показывает, что параметры по пропускной способности могут достичь эталонных значений только через 8,0–8,5 мин традиционной УЗ-очистки. Это говорит о двукратно большей производительности предлагаемой схемы. При работе по комбинированной схеме на частоте, соответствующей кавитации жидкости, наблюдается более сильная зависимость эффективности очистки от времени обработки. Однако по абсолютному значению за первую минуту обеспечивается восстановление 49–50 % пропускной способности. Только через 5 мин пропускная способность восстанавливается на 97 %.

Оценивали влияние степени исходной загрязненности каналов на процесс их очистки по расходу воды, проливаемой через горелку. Из имевшихся в распоряжении горелочных устройств удалось

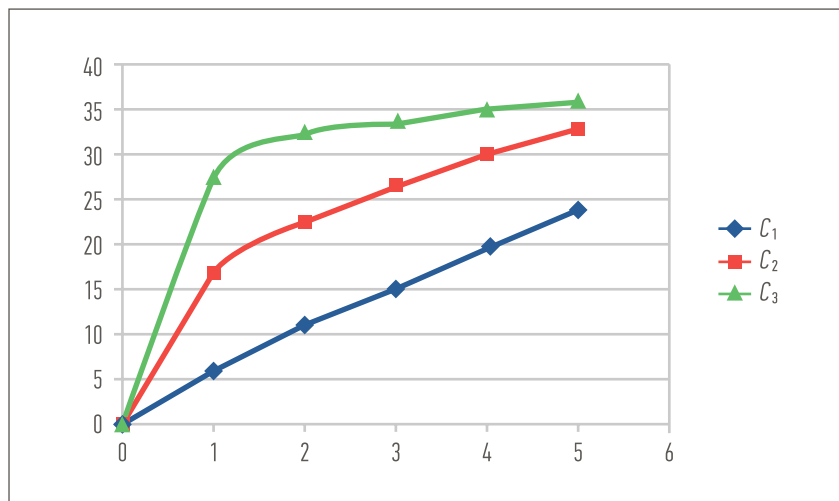


Рис. 4. Зависимость эффективности удаления загрязнений ΔT (уменьшение времени накачки баллона через горелочное устройство от исходного состояния) от времени очистки t при различных условиях очистки: C_1 – общая очистка в условиях интенсивной кавитации (23,5–23,6 кГц); C_2 – комбинированная очистка – воздействие на горелку одновременно с кавитацией жидкости в условиях интенсивной кавитации (23,5–23,6 кГц); C_3 – комбинированная очистка на частоте 22,3 кГц

выделить две группы по степени загрязненности: с высокой загрязненностью (малый расход воды, составляющий $0,024 \cdot 10^{-3}$ – $0,012 \cdot 10^{-3}$ м³/с) и небольшой загрязненностью (расход воды, составляющий $0,045 \cdot 10^{-3}$ – $0,032 \cdot 10^{-3}$ м³/с). Установлено, что предлагаемая схема очистки наиболее эффективна при значительной загрязненности каналов в начале цикла, т. е. в первую минуту. При увеличении времени очистки до 5 мин частота колебаний излучателя практически не влияет на эффективность очистки по предлагаемой схеме. В случае наличия малого количества загрязнений эффективность предлагаемой контактной схемы соизмерима с обычной схемой очистки, а при большем времени воздействия последняя может оказаться даже более эффективной. Это может быть связано с тем, что при малых толщинах отложений интенсивность воздействия общей кавитации оказывается достаточной для их разрушения и эвакуации, а повсеместное, хотя и слабое, воздействие в течение длительного времени способствует разрушению загрязнений с удаленных от

точек контакта зон горелочного устройства, где вибрации корпуса малоощутимы или располагаются узловые точки.

На основании выполненных исследований, доказавших эффективность контактной схемы очистки и позволивших определить рациональные режимы УЗ-воздействия, было разработано техническое задание, по которому ОАО «НИТИ-Тесар» изготовило опытный образец автоматизированной установки (рис. 5).

В соответствии с техническим заданием конструкция установки имеет модульное исполнение и содержит такие модули, как УЗ, гидравлический, нагревательный, контрольно-измерительный и управляющий, монтажный.

К числу особенностей установки относятся герметичный шумоизолирующий шкаф с вытяжной вентиляцией для размещения УЗ-ванны и изделия, а также гибкий трубопровод включения последнего в гидравлическую систему.

В гидравлической системе установки используются два фильтра грубой и тонкой (до 30 мкм)



а) б)

Рис. 5. Экспериментальный образец установки:
а) фронтальный вид со стороны панели управления; б) вид со стороны гидросистемы

очистки, теплоизоляция трубопроводов и расходной емкости для стабилизации температуры мощней жидкости, прецизионный УЗ-расходомер жидкости. В установку также входят УЗ-ванна с пятью УВ-излучателями, работающими на общий ступенчатый волновод из сплава Д16Т, и генератор выходной мощностью 1,5 кВт. Регулировка расхода жидкости осуществляется за счет применения частотного преобразователя в системе питания двигателя насоса и байпасной системы (обратный трубопровод с регулировкой проходного сечения), что обеспечивает экономичность и надежность.

Автоматика установки основана на непрерывном контроле расхода жидкости через каналы очищаемого горелочного устройства, изменяющегося в процессе очистки. Измерительное устрой-

ство предварительно настраивается по эталонному (не бывшему в эксплуатации) изделию. С учетом требований импортозамещения в установке был применен отечественный УЗ-расходомер-счетчик типа ЭТАЛОН-РМ-1К1Л (DN 50) с комплектом накладных датчиков, характеризующийся высоким уровнем защищенности и точности. Расходомер обеспечивает измерение расхода жидкостей в диапазоне скоростей потока 0,01–12 м/с с содержанием твердых включений до 5 % с погрешностью не более 1 %.

Опытная эксплуатация установки в производственных условиях подтвердила результаты экспериментальных исследований и обеспечила восстановление пропускной способности горелочных устройств до уровня не ниже 97–100 % от эталонной.

Таким образом, в результате проведенных в 2013–2015 гг. ООО «Газпром трансгаз Саратов» совместно с СГТУ им. Ю.А. Гагарина экспериментальных исследований и проектно-конструкторских работ решена задача восстановления работоспособности и продления ресурса горелочных устройств к ГПА, работающим в системе транспортировки природного газа, позволившая повысить ее эффективность. При этом:

- проведен анализ имеющейся проблемы и экспериментально обоснован новый способ комбинированной УЗ-очистки отверстий и каналов в горелочных устройствах к ГПА, на который получено решение о выдаче патента на изобретение;

- обоснована рациональная схема очистки и доказана возможность восстановления пропускной способности горелочных устройств до 97–100 %;

- обоснованы технологические режимы очистки (частота ультразвука и время) и технические требования к автоматизированной УЗ-установке с активным контролем процесса по изменению расхода мощней жидкости;

- изготовлен, отлажен и введен в опытную эксплуатацию экспериментальный образец установки;

- проведены производственные испытания установки по очистке комплектов горелочных устройств, а также контрольные испытания очищенных комплектов в составе агрегатов, подтвердившие эффективность разработанного метода комбинированной УЗ-очистки. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Бржозовский Б.М., Бекренев Н.В. Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении: Учеб. пособие. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. 348 с.
2. Водопьянов В.И., Савкин А.Н., Кондратьев О.В. Курс сопротивления материалов с примерами и задачами: Учеб. пособ. Волгоград: ВолгГТУ, 2012. 136 с.
3. Марков А.И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов. М.: Машиностроение, 1968. 324 с.
4. Сарсенгалиев А.М., Аврамов М.В., Бекренев Н.В. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов в процессе ультразвуковой контактной очистки // Информационно-коммуникационные технологии в науке, производстве, образовании (ICIT-2016): Сб. мат-лов Междунар. научно-техн. конф. Воронеж: Научная книга, 2016. С. 120–125.
5. Злобина И.В., Бекренев Н.В., Петровский А.П. и др. Восстановление пропускной способности горелочных устройств к газоперекачивающим агрегатам путем избирательной ультразвуковой очистки // Сб. мат-лов VIII Всерос. науч.-техн. интернет-конф. с междунар. участием «Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике», г. Пермь, 1–30 ноября 2014 г. С. 81–87.
6. Сарсенгалиев А.М., Бекренев Н.В., Аврамов М.В. и др. Новая ультразвуковая технология восстановления работоспособности горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов // Научно-технические технологии в машиностроении. 2016. № 2. С. 39–43.