

УДК 621.643.03; 62.768

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВ СНИЖЕНИЯ ВИБРАЦИЙ ТРУБОПРОВОДОВ С ДВУХФАЗНЫМ ТЕЧЕНИЕМ ДЛЯ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ТЭС

Велькин В.И., Пахалуев В.М., Щеклеин С.Е.

*Уральский федеральный университет им.первого Президента России Б.Н.Ельцина
г. Екатеринбург,*

Безаварийная работа энергетических установок во многом определяется надежностью эксплуатации трубопроводов с различного рода теплоносителями и их структурой. Вибрации и коррозионно-эрозионный износ трубопроводов с двухфазной средой или жидкостные с температурой, близкой к температуре насыщения, зачастую становятся причиной выхода из строя трубопроводов на ТЭС, АЭС, ГеоТЭС.

В процессе освоения парогидротермальных месторождений приобрели актуальность проблемы, связанные с пароводяными течениями при транспортировке флюида к потребителю. Для работы ГеоТЭС пароводяная смесь из скважины транспортируется до электростанции, причем длина трубопроводов может достигать значительных величин. В зависимости от парособержания и структуры потока в трубопроводах могут возникнуть значительные пульсации давления и гидроудары, что ведёт к преждевременному износу, а в некоторых случаях – к разрушению элементов оборудования парогидротермальных промыслов. [1]

Одним из направлений при решении проблемы снижения вибраций трубопроводов, является использование активных и пассивных устройств, воздействующих на гидродинамику двухфазного потока, уменьшающих влияния или устраняющих наиболее опасный снарядный режим течения с прерывистой структурой. [2, 3].

Анализ эффективности воздействия различного рода вставок-завихрителей, относящихся к пассивным средствам снижения вибраций трубопроводов, показал, что использование вставок с эвольвентными поверхностными канавками является перспективным и обладает определённым преимуществом по сравнению с устройствами закрутки потока по всему сечению трубопровода с помощью вставок, перекрывающих всю ширину канала [4]. В частности, они имеют меньшее гидравлическое сопротивление и могут устанавливаться последовательно по длине трубопровода по мере затухания интенсивности завихрения потока при незначительных общих потерях давления.

Исследования влияния закрутки двухфазного потока с помощью вставок-завихрителей с эвольвентными канавками проводились на гидродинамическом стенде с воздухо-водяным потоком, циркулирующем в замкнутом контуре из труб диаметром 40 мм с прозрачными секциями из оргстекла для визуализации течения (рис. 1).

Подача воды осуществлялась из бака емкостью 2,0 м³ центробежным насосом с расходом воды до 30 м³/час и напором до 0,5 МПа. Воздух подавался из компрессора с тем же предельным расходом и давлением до 1,0 МПа. Воздуховодяной смеситель выполнен в виде цилиндрической вставки с коаксиальной трубкой для ввода воздуха в направлении течения потока.

В состав основной измерительной аппаратуры входили расходомеры типа Сапфир-22 DD, манометры, виброанализатор СД-12М для сбора и статистического анализа вибраций. Управление частотно-регулируемыми электроприводами насоса и компрессора вместе измерительной аппаратурой осуществлялось микропроцессорной системой специально разработанного программного комплекса.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ВИБРАЦИЙ ТРУБОПРОВОДОВ



Рис. 1. Экспериментальный стенд для исследований вибраций в трубопроводах с двухфазным течением

Конструктивные характеристики и общий вид завихрителей с эвольвентными канавками приведены в работе [5]. Размеры канавок составляли 2x2 мм при длине всей вставки 200 мм, причем угол закрутки канавок равнялся $\varphi = 65^\circ$ для всех вставок. Интенсивность закрутки потока определялась числом канавок на внутренней поверхности вставок, равным 3, 6, 9, 12, 22 и 30. В качестве энергетической характеристики интенсивности закрутки использовалось соотношение между кинетической энергией закрученной части потока и энергией поступательного (осевого) потока на выходе из завихрителя.

$$\varepsilon = (tg \varphi)^2 nf / F_0; \quad tg \varphi = U_\varphi / U_0 \quad (1)$$

где n – число канавок завихрителя; f и F_0 – значение суммарной площади поперечного сечения канавок и цилиндрического канала; U_φ и U_0 – тангенциальная и осевая скорости потока.

Гидравлические характеристики вставок-завихрителей находились по измерениям перепада давления в уравнении Дарси-Вейсбаха для однофазного потока:

$$\xi = 2 (d / L) (\Delta p / \rho U_0^2) \quad (2)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) вставки; d и L – гидравлический диаметр и длина вставки.

На рис.2. приведены значения КГС вставок-завихрителей с различным числом канавок в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = U_0 d / \nu$ от 10^4 до 2×10^5

Полученные данные по КГС обобщены степенной зависимостью:

$$\xi / \xi_0 = 1 + 2,65 \varepsilon^{0,25} \quad (3)$$

где ξ_0 – КГС для вставки с гладкой внутренней поверхностью (без закрутки потока), практически совпадающей с формулой Блаузиса $\xi_0 = 0,316 / Re^{0,25}$.

Здесь же приведены значения КГС для труб с винтовой вставкой из скрученной ленты, рассчитанные для относительного шага закрутки, соответствующего углу $\varphi = 65^\circ$ [4]. Как видно из графика, гидравлическое сопротивление вставок с поверхностными канавками заметно ниже, чем с винтовыми вставками, полностью перекрывающими проходное сечение трубы.

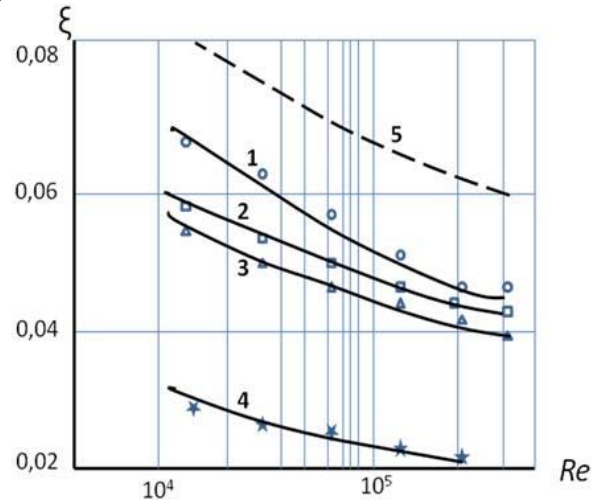


Рис. 2. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления вставки-завихрителя от числа Re . 1, 2, 3-вставки с числом канавок 6, 12 и 22; 4-вставка с гладкими стенками; 5-винтовая вставка с относительным шагом, соответствующим углу закрутки $\varphi = 65^\circ$ [3]

Вставка-завихритель придает газо-жидкостному потоку вращательно-поступательное движение с интенсивностью, определяемой числом канавок и расходной скоростью потока. При снарядном режиме течения из жидкостной пробки формируется пристенный слой вдоль внутренней поверхности канала, т.е. режим течения становится близким к дисперсно-кольцевому.

Для образования устойчивого кольцевого слоя жидкости требуется определенная тангенциальная (окружная) скорость U_φ закрутки, зависящей при выбранном угле закрутки от осевой скорости потока U_0 или числа Рейнольдса жидкой фазы. Минимальное значение Re_m для выполнения этого условия можно оценить из аналитического выражения скорости вращения при получении полых заготовок в процессах центробежного литья [6]. В терминах двухфазного газо-жидкостного потока при равенстве истинного и объемного газосодержания условием образования устойчивого кольцевого слоя в горизонтальном канале служит выражение

$$Re_m > (1,2\pi/\text{tg}\varphi) \sqrt{[gR_0^3(1-0,14\beta)]/v^2\beta^{0,5}} \quad (4)$$

где β – объемное газосодержание; R_0 – радиус канала; g – ускорение силы тяжести; φ – угол закрутки потока на выходе вставки-завихрителя; v – кинематическая вязкость жидкости.

Для условий опытного стенда с диаметром 40 мм и углом закрутки потока $\varphi = 65^\circ$ значения Re_m в соответствии с (4) составляло от $3,9 \times 10^4$ до $2,6 \times 10^4$ с увеличением объемного газосодержания от 0,2 до 0,7. Полученные значения Re_m характеризуют равновесный режим взаимодействия слоя жидкости с газовой областью, которая образуется в центральной части канала. Процесс сепарации (разрушения) жидкостной пробки требует большей интенсивности закрутки и, следовательно, больших значений чисел Re_m .

Измерения значений вибрации трубопровода осуществлялись на вертикальных участках за вставкой-завихрителем непосредственно за поворотным коленом. Методи-

ка проведения измерений и обработка данных, включающих определение спектральных характеристик и среднеквадратичных значений (СКЗ) виброперемещений, приведена в работе [5]. Заметное влияние закрутки двухфазного потока на уменьшение уровня вибраций наблюдалось при $Re > 10^5$. Как видно (рис.3), характер изменения СКЗ виброперемещений определяется значениями газосодержания потока β и числом канавок вставки-завихрителя.

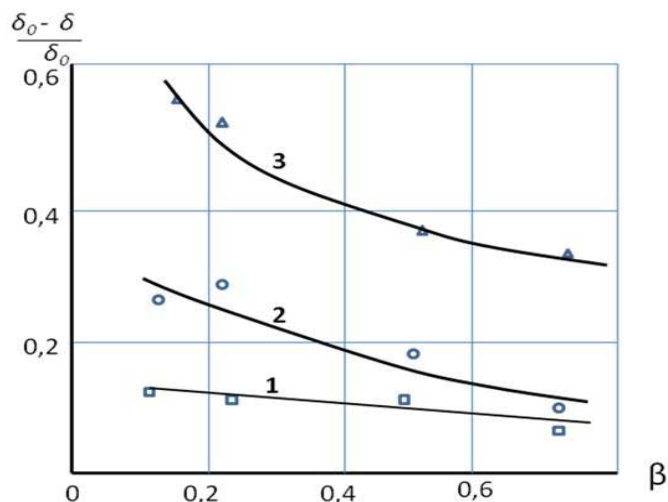


Рис. 3. Относительное снижение СКЗ вибраций трубопровода опытного стенда в зависимости от газосодержания потока и типа вставки при $Re = 4 \times 10^4$; 1, 2, 3-вставки с 6, 12 и 22 канавками.

Полученные данные аппроксимировались в виде СКЗ виброперемещений участка трубопровода с различными вставками-завихрителями δ по отношению к соответствующим значениям СКЗ для гладкой вставки δ_0 в виде:

$$\delta / \delta_0 = 1 - 6,75 Re_d^{-0,15} \beta^{-2\varepsilon} \varepsilon; \quad Re = 4G / \pi d v; \quad (6)$$

где G - объемный расход жидкости; d - диаметр трубопровода.

В диапазоне изменения расхода жидкости с $Re=4 \times 10^5 \dots 2 \times 10^6$ и объемного газосодержания $\beta = 0,1 \dots 0,7$ погрешность обработки данных по формуле (6) не превышала 25 %.

Значение ε в формуле (6) характеризует начальную энергию закрученного потока непосредственно за вставкой -завихрителем, которая расходуется не только на разрушение жидкостных пробок двухфазного потока, но и на преодоление дополнительного гидравлического сопротивления из-за вращательной составляющей скорости в пристенной области в направлении течения. Эти факторы проявляются в снижении эффективности закрутки потока на уровень вибраций трубопровода с возрастанием числа Re .

Анализ результатов проведенных измерений и их статистическая обработка показали, что эвольвентные вставки-завихрители являются достаточно эффективными пассивными устройствами, позволяющими при сравнительно малом гидравлическом сопротивлении снизить уровень вибраций трубопроводов с двухфазными потоками в 1,5...2 раза.

Разработанные конструкции пассивных завихрителей могут быть применены в энергетическом оборудовании и, в частности, на скважинах геотермальных ТЭС для снижения вибраций и эрозионного уноса в трубопроводах с двухфазным течением.

Литература

1. Шулюнин А.Н. Гидравлический расчет транспортировки пароводяного теплоносителя на геотермальных месторождениях Камчат ГТУ. 2008. -94 с.
2. Федорович Е.Д., Фокин Б.С., Аксельрод А.Ф. и др. Вибрация элементов оборудования ЯЭУ.-М: Энергоатомиздат 1989.-168 с.
3. Беленький М.Я., Готовский М.А, Фокин Б.С. Устранение вибраций трубопроводов, транспортирующих вскипающие и двухфазные потоки// Теплоэнергетика.-1996.-№3, с.41-46
4. Касина В.И., Леонтьев А.И. Гидравлическое сопротивление закрученных потоков воды и пароводяной смеси в трубах.//Теплоэнергетика -2005.-№3, с.40-47.
5. Велькин В.И., Комоза Д.С., Крутиков А.Ю. Микропроцессорный блок управления комплексным диагностическим стендом для исследования трубопроводов АЭС// Известия ВУЗов. Ядерная энергетика.-2009.-№1, с.4-8.
6. Юдин С.Б., Левин М.М., Розенфельд С.Е., Центробежное литьё. М.Машиностроение. 1972, с.279.