



Совершенствование электрообогрева подводных морских трубопроводов

J. K. Lervik,
SINTEF Energy Research N-7465 Тронхейм,
Норвегия

H. Kulbotten,
SINTEF Energy Research N-7465 Тронхейм,
Норвегия

A. Nysveen,
Норвежский Институт Естественных
Наук и Технологии, N-7491 Тронхейм,
Норвегия

Øyvind Iversen,
Отдел гибридных подводных кабелей, Nex-
ans Норвегия AS, 0663 Осло, Норвегия

Перевод доклада "Developments of electrical heating for subsea pipelines", опубликованного в трудах Международной конференции HES-13, Падуя, Май 21-24, 2013 выполнен А.А. Лаптевым

15-летний опыт использования прямого электронагрева (ПЭН) для обеспечения потока в подводных трубопроводах подтверждает надёжность, экономичность и гибкость этого метода.

ПЭН имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными способами основанными на использовании химикатов для предотвращения осаждения гидратов. ПЭН может быть включён немедленно в случае останова (непредвиденного или планового). Он применим для различных потребностей трубопровода в подводе тепла, т.е. для поддержания температуры содержимого трубы выше точки образования гидратов, разогрева из холодного состояния, растапливания парафина и обогрев во время выбирания остатков, с настраиваемой по-

дачей тепла, приспособляемой к темпу добычи и тепловым свойствам/условиям. Сброс давления может использоваться чтобы избежать формирования гидратов, но это не всегда возможно, особенно для глубоководных месторождений.

Для дальнейшей разработки новых глубоководных месторождений с несколькими трубопроводами и увеличенными расстояниями для транспортировки, электрообогрев становится всё более привлекательным. В глубоких водах удаление пробок сбросом давления может быть невозможно. Стоимость и вес являются важными вопросами, когда ПЭН приспособляется для монтажа глубоко под водой. В общем случае увеличение частоты напряжения питания снижает размер и вес электрооборудования, и повышенные частоты теперь используются в новых программах разработки ПЭН для глубоководных месторождений.

Введение

Поскольку нефтегазовая промышленность развивается в направлении больших морских глубин и расстояний транспортировки, электрообогрев становится всё более привлекательным. Снижение стоимости, веса и объёма важно для развития ПЭН (прямого электронагрева) для глубоководных месторождений. В настоящее время ПЭН применим для месторождений с глубиной по крайней мере 1000 м, и рассматривается сейчас для залежей повышенной глубины, до приблизительно 3000 м. Система ПЭН на данный момент квалифицирована для питания частотой 50/60 Гц, подаваемого от местной сети, обычно используемой в Северном море. Однако, использование более высоких частот питания будет выгодно, чтобы снизить вес и объём силового оборудования, а также уменьшить поперечное сечение кабелей, используемых в ПЭН. Потенциальные термические ограничения для вертикальных (стволовых) кабелей тоже снизятся при повышении частоты. Более того, рост частоты снижает величину тока, передаваемого в мор-

скую воду и длину зон передачи тока (ЗПТ) у концов обогреваемых трубопроводов. Поэтому ожидается, что повышение частоты уменьшит количество анодов, необходимых для передачи переменного тока и защиты от коррозии на переменном токе.

Как первое приближение к использованию повышенной частоты, рассматривается 100 Гц, имеется ввиду также частота 200 Гц. Подводные силовые кабели используются на этих частотах для других целей (подвод питания к насосам с переменной скоростью вращения и т.п.) и поэтому ожидается, что модификация кабелей для целей ПЭН потребует небольшой доработки. Однако применение этих частот питания потребует оценки их возможного влияния на механизмы старения кабеля. Этот вопрос может зависеть от решения, применённого для преобразователя, что связано с деградацией изоляции из XLPE (поперечно сшитого полиэтилена) из-за переходных напряжений.

Изменение уровня ПЭН с повышением частоты повлияет на электрические характеристики системы, распределение тока между морской водой и стальной трубой, а также между проводниками силового кабеля, стальной трубой и морской водой. В данной статье представлены результаты теоретического подхода. Ожидается, что потребуются работы по оценке того, что будет необходимо для внедрения высокой частоты, но это выходит за рамки данной статьи.

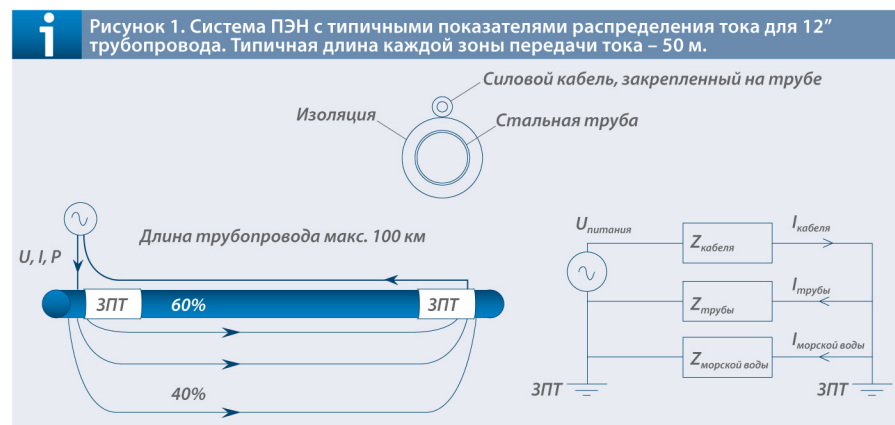
Показатели ПЭН на повышенных частотах

Основные преимущества повышенной частоты

Схематический чертёж системы ПЭН [1, 2, 3] представлен на Рисунке 1 вместе с эквивалентной схемой электрической цепи. Зоны ЗПТ требуются для заземления трубопровода и для обеспечения протекания токов в морской воде и в трубопроводе. Зона передачи тока (ЗПТ) снабжена анодами с достаточной площадью контакта с морской водой, так, чтобы поддерживать передаваемый ток на приемлемом уровне, чтобы соблюсти требования по защите от коррозии на переменном токе.

Для существующих установленных систем, работающих на частоте 50 Гц, обычно 60% подаваемого тока передаётся по трубопроводу и 40% через ЗПТ у концов трубы уходит в морскую воду. Длина ЗПТ приблизительно 50 м, там расположено около 25 анодов. В общем случае увеличение частоты приводит к возрастанию потерь мощности в проводнике и, следовательно, к увеличению температуры. Основными преимуществами повышенной частоты поэтому являются:

- Меньшие токи, требуемые для достижения такого же нагрева стальной трубы.
- Уменьшенное сечение проводников вследствие меньших требуемых токов.
- Меньшая длина ЗПТ и уменьшенное количество анодов



Распределение тока и мощности по-
терь в стальной трубе,
проводниках силового кабеля
и морской воде.

Тепловыделение в трубе, P , опреде-
ляется следующим соотношением:

i (1)

$$P = R_{ac} \cdot I^2$$

Где R_{ac} – сопротивление на перемен-
ном токе, I – ток в трубопроводе.

Сопротивление трубы на перемен-
ном токе может быть в десятки раз
больше сопротивления на постоян-
ном токе ввиду неравномерного рас-
пределения тока внутри ферромаг-
нитного материала. Тепловыделе-
ние определяется моделированием
электромагнитного поля или прямы-
ми измерениями на образцах с соот-
ветствующей геометрией и протека-
ющими токами. Плотность тока в тру-
бе меняется как в радиальном на-
правлении (скин-эффект), так и по
окружности из-за влияния тока, теку-
щего в расположенном на нём кабе-
ле (эффект близости).

Относительная магнитная проницае-
мость сильно влияет на распределе-
ние тока в поперечном сечении тру-
бы и, соответственно на тепловыде-
ление [5]. Для материалов с линей-
ными магнитными характеристиками
глубина проникновения является по-
казателем перераспределения тока
(скин-эффект). Глубина проникнове-
ния для цилиндрического объекта
(труба) определяется соотношением:

i (2)

$$\delta = \sqrt{2 \cdot \rho / \omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}$$

Где

i (3)

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

f – частота [Гц]

ρ – сопротивление [Ом·м]

δ – глубина проникновения [м]

μ_0 – магнитная проницаемость возду-
ха, равная $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ [Генри/м]

μ_r – относительная магнитная прони-
цаемость

При постоянной μ_r , при толщине
стенки трубы $WT \gg \delta$ и за счет концен-
трического возвратного тока (пере-
распределение тока определяется
только скин-эффектом), сопротивле-
ние трубы переменному току опре-
деляется по формуле:

i (4)

$$R_{ac} = \rho \cdot s / \pi \cdot \delta \cdot d$$

Где s – длина и d – наружный диаметр.
Из уравнений (1-4) видно, что сопро-
тивление трубы на переменном токе
пропорционально квадратному кор-
ню из частоты.

Расчёты тепловыделения и импедан-
са для систем прямого электронагре-
ва усложняются тем фактом, что стали,
из которых изготовлена труба, имеют
нелинейные магнитные характеристи-
ки [2], т.е. их относительная проница-
емость зависит от магнитного поля H :

i (5)

$$\mu_r = f(H)$$

На практике импеданс системы, включая
тепловыделение в трубе, рассчитывает-
ся по программе электромагнитного мо-
делирования, где относительная прони-
цаемость является важным входным па-
раметром. Возможны два приближения:

- Определение относительной прони-
цаемости из измеренной кривой про-
намагничивания (плотность потока
в зависимости от магнитного поля),
- Введение эффективной относи-
тельной проницаемости как функ-
ции тока I . (см. примечание 1)

При втором методе тепловыделе-
ние в трубе рассчитывается как функ-
ция относительной проницаемости
и сравнивается с измеренным теп-
ловыделением на испытательной
установке с соответствующей гео-
метрией и током. Это обеспечивает
адекватную точность величины со-
противления на переменном токе,
определённой для системы прямо-
го нагрева путём электромагнитно-
го моделирования, но при этом реак-
тивная составляющая системы необ-
язательно рассчитывается правиль-
но.

Для трубопроводов из углеродистой
стали глубина проникновения суще-
ственно меньше толщины стенки. Из
уравнений (1-3) видно, что сопротив-
ление на переменном токе пропор-
ционально квадратному корню от ча-
стоты. Типичные величины сопротив-
ления и относительной проницаемо-
сти для углеродистой стали (материал
стальной трубы), меди (проводник
кабеля) и морской воды показаны в
Таблице 1. Глубина проникновения
для этих материалов на частотах 50,
100 и 200 Гц включена в эту таблицу.

Были проведены расчёты по компью-
терной программе, использующей
метод конечных элементов [4] для
распределения тока и сопротивле-
ния на переменном токе в стальной
трубе, проводниках кабеля и воде.

Результаты расчётов распределения
тока в 12" стальной трубе с толщи-
ной стенки 15 мм для системы ПЭН,
показанной на Рисунке 1, приведе-
ны на Рисунке 2. Ток питания 1 кА для
всех случаев. Как видно из результа-
тов, перераспределение тока более
выражено при увеличении частоты,
и максимальное значение плот-
ности тока возникает на наружной
поверхности трубы вблизи установ-
ленного на ней кабеля питания си-

Таблица 1. Свойства материалов

Материал	Сопротивление при 20°C [Ом·м]	Относительная проницаемость	Глубина проникновения [мм]		
			50 Гц	100 Гц	200 Гц
Медь	1.8·10 ⁻⁸	1	9.5	6.7	4.8
Углеродистая сталь (X65)	2.0·10 ⁻⁷	400	1.6	1.1	0.8
Морская вода	3.0·10 ⁻¹	1	39000	28000	19000

Рисунок 2. Распределение тока по толщине стенки стальной трубы толщиной 15 мм.

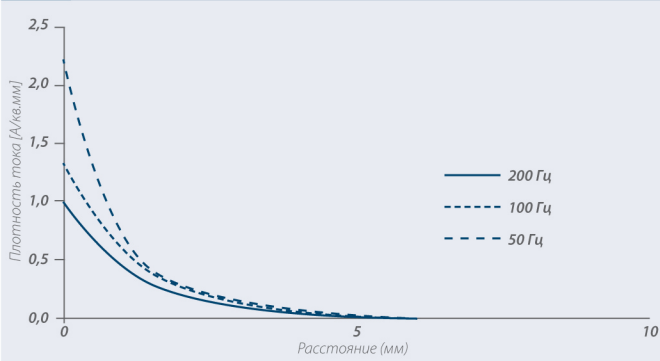


Рисунок 3. Отношение сопротивлений ас/дс в зависимости от сечения медного проводника

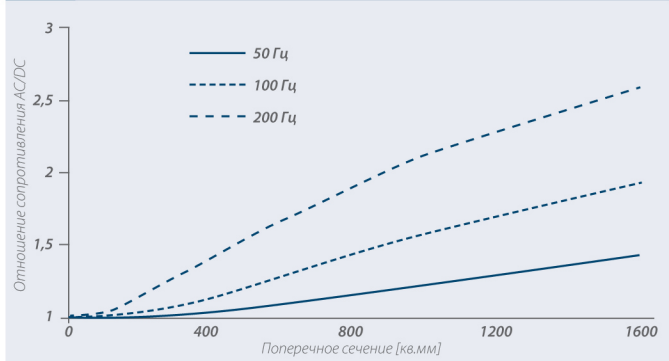
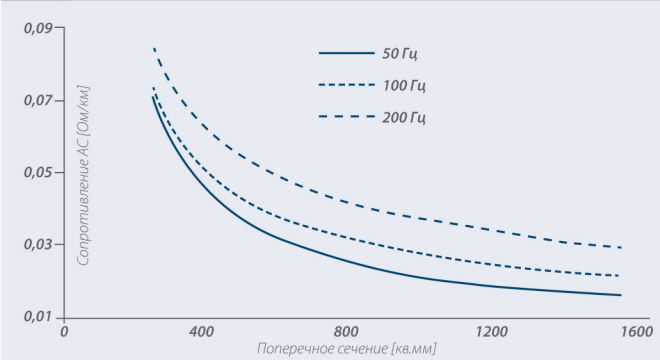


Рисунок 4. Сопротивление перем. току в зависимости от сечения медного проводника



стемы. Ток проходит только в наружном слое стальной стенки толщиной в несколько миллиметров. На расстоянии глубины проникновения от поверхности стальной трубы плотность тока снижается до приблизительно 36% его величины на поверхности. Следствием более выраженного распределения тока при повышенных частотах является увеличенное выделение тепла в стальной трубе и, следовательно, ток может быть уменьшен для достижения той же целевой температуры трубы.

В установленных системах ПЭН с частотой 50 Гц, сечение медного проводника силового кабеля обычно 1000-1200 мм² для кабеля, установленного на трубе и до 1600 мм² для подводящих кабелей горизонтальных и вертикальных).

сопротивлений на переменном и постоянном токе в зависимости от сечения проводника. Рисунок 4 иллюстрирует зависимость сопротивления на переменном токе от сечения проводника. Тепловыделение в проводнике определяется Уравнением (1), сопротивление на переменном токе берётся из Риска 4.

Результаты расчёта сопротивлений трубы и морской воды на переменном токе даны в Таблице 2, из которой видно, что сопротивления существенно возрастают с частотой. Поэтому тепловыделение в стальной трубе будет выше при том же токе но повышенной частоты. Согласно Рисунок 1, ток в морской воде обычно составляет 40% от тока питания, и практически не зависит от частоты в рассматриваемом диапазоне.

При повышенной частоте сечение может быть уменьшено ввиду снижения тока. Однако, сопротивление проводника на переменном токе возрастает с частотой. На Рисунок 3 показано отношения

Показатели ПЭН

Влияние увеличения частоты с 50 Гц до 200 Гц на основные электрические параметры ПЭН изучены для величины общего коэффициента теплопередачи 3 Вт/м² К для труб 8", 12" и 20" при длине трубопровода до 80 км. Параметры ПЭН должны обеспечить выполнение следующих требований:

- Поддержание содержимого трубы при температуре приблизительно на 20 °С выше окружающей во

Таблица 2. Рассчитанные сопротивления на перем. токе для 12" стальной трубы ПЭН и морской воды

Частота [Гц]	Сопротивление стальной трубы на переменном токе [Ом]	Сопротивление морской воды на переменном токе [Ом]
50	15·10 ⁻⁵	39·10 ⁻⁶
100	22·10 ⁻⁵	76·10 ⁻⁶
200	33·10 ⁻⁵	145·10 ⁻⁶

Рисунок 5. Исследованные системы ПЭН.



избежание образования гидратов при перерывах в добыче.

- Разогрев содержимого трубы после остывания до температуры выше температуры образования гидратов в течение 2 дней,
- Разогрев до приблизительно 40 °С для удаления парафина.

На Рисунок 5 показана конфигурация ПЭН с кабелем питания, установленным на теплоизолированной трубе. Электрическая цепь, эквивалентная системе ПЭН, показанной на Рисунок 1, изображена на Рисунок 6 с "n"

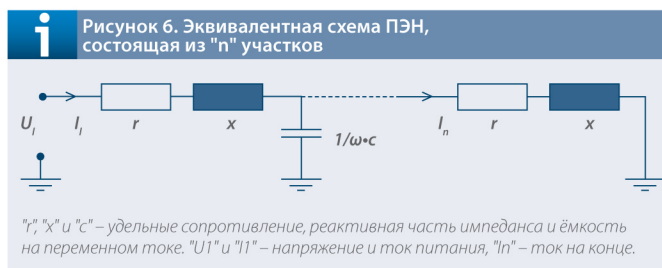
сегментами. В этой цепи напряжение питания равно U_1 и ток питания – I_1 . I_n – ток в конце. Из-за ёмкости кабеля C , ток в кабеле и в стальной трубе будет меняться вдоль трубопровода. Для реальных случаев ток будет немного снижаться к концу. Увеличение тока приводит к экспоненциальному росту напряжения питания и суммарного тепловыделения с увеличением длины трубопровода, обогреваемого ПЭН, см. Рисунки 7-8. Этот рост больше при более высоких частотах. Результаты, представленные на Рисунках 7-8 относятся к трём размерам трубы 8", 12" и 20". Можно видеть, что напряжение и потребляемая мощность возрастают приблизительно линейно для частоты 50 Гц, и экспоненциально при более высоких частотах. Линейный участок зависимости – до 20 км при 200 Гц и до 40 км при 100 Гц. Отсчётная точка 100% на этих рисунках – значение при 10 км для соответствующего размера трубы.

На Рисунках 9 и 10 показан требуемый ток и суммарная потребляемая мощность на всю длину (суммарное

тепловыделение на длину) в зависимости от частоты, необходимые для достижения целевой температуры стальной трубы. Референсное

значение 100% на этих рисунках – это величина при 50 Гц для соответствующего размера трубы. Требуемый ток снижается при увеличении частоты. Снижение немного меньше для больших размеров трубы. Снижение составляет приблизительно 20% при 100 Гц и 35% при 200 Гц для 12" трубы. Тепловыделение возрастает приблизительно на 50% при 100 Гц и более чем на 100% при 200 Гц.

Следствием снижения токов при повышенных частотах является уменьшение сечения проводников кабеля. Однако, на повышенных частотах сопротивление проводников на переменном токе возрастает и до некоторой степени оказывает противоположное воздействие, см. Рисунок 4. Влияние повышения частоты вклю-



к ПЭН системе, работающей при 50 Гц. Требуемое сечение дано для каждой частоты при принятом равном сопротивлении на переменном токе. Если тепловые потребности требуют сечения 1000 мм² (при 50 Гц), то соответствующее сечение при 100 Гц составляет около 700 мм² и около 600 мм² при 200 Гц.

Результаты расчета требуемой мощности, напряжения питания, токов и сечения уложенного на трубе проводника показаны в Таблицах 3, 4 и 5 для 20" трубопровода при поддержании содержимого трубы при температурах на 20°C и 40°C выше температуры окружающей морской воды.

В Таблицах 3 и 4 показаны результаты для 10 км и поддержания содержимого трубы при температуре выше температуры окружающей воды на 20°C и 40°C соответственно. Как видно, требуемое сечение существенно меньше при повышенной частоте.

В Таблице 5 показаны результаты для 30 км и поддержания содержимого трубы при температуре на 20°C выше температуры окружающей воды. Как видно, требуемое сечение проводников, уложенного на трубе кабеля, существенно меньше при повышенной частоте 100 Гц, но не при 200 Гц, по сравнению с 50 Гц. Причина состоит в значительном возрастании

эффект возрастания сопротивления на повышенных частотах и требуемые токи, приведённые на Рисунке 9, учтено в Рисунок 11. По оси x этого графика отложено эффективное сопротивление на переменном токе, отнесённое

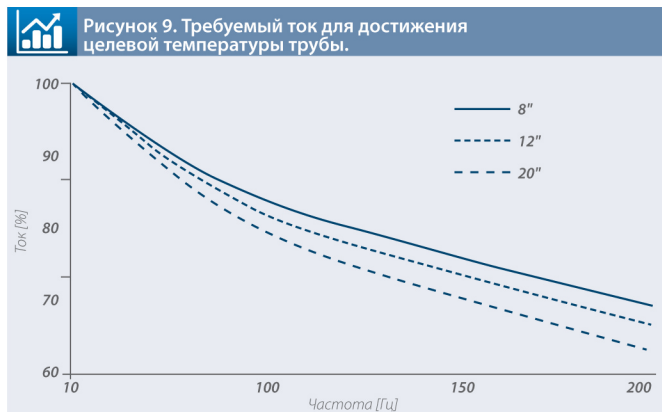
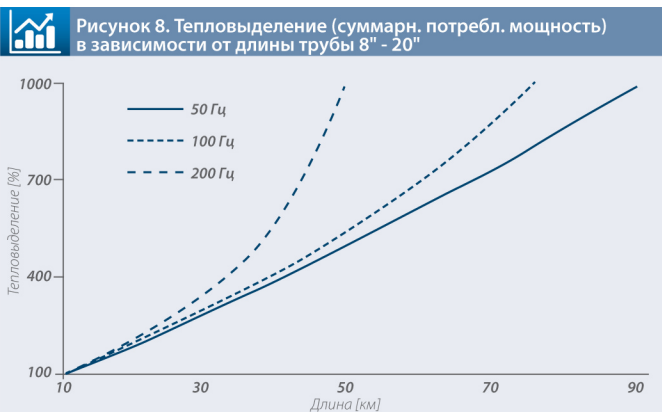
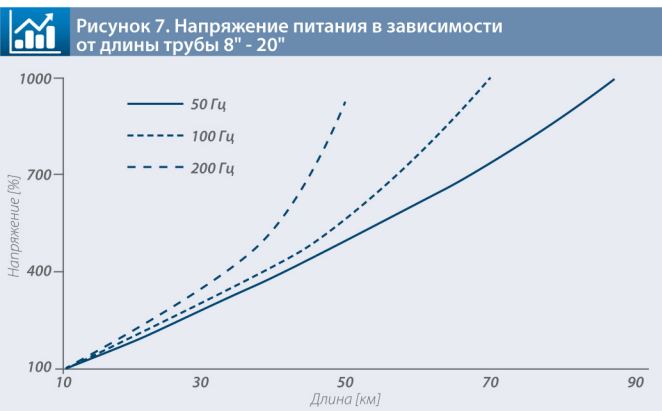
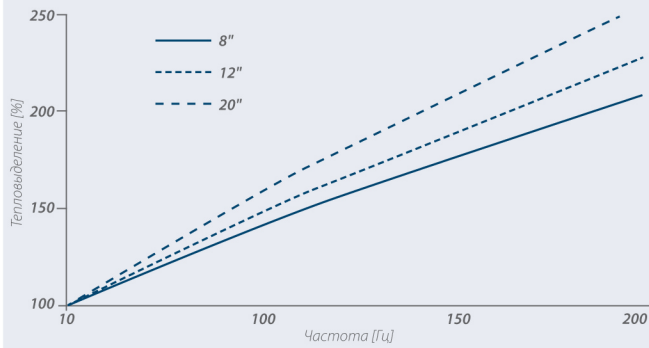




Рис. 10. Тепловыделение (сумм. мощность), требуемое для достижения целевой температуры трубы.



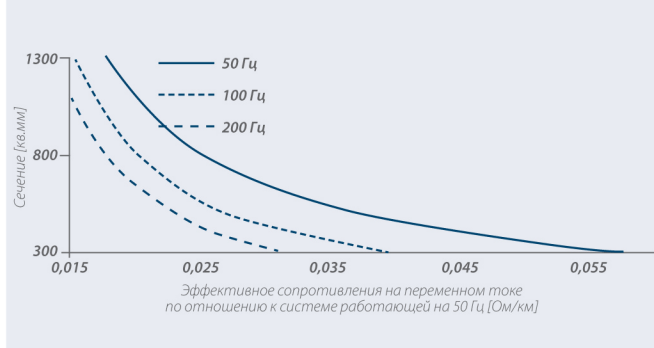
тока к концу при 200 Гц, что требует большего сечения проводника кабеля, см. Рисунки 7 и 8.

Как показано выше, выигрыш в сечении проводника и уровне напряжения от использования систем, работающих на 100 Гц и 200 Гц отсутствует для обогреваемых ПЭН трубопроводов длиннее приблизительно 30 и 10 км соответственно. При 50 Гц дли-

на ограничивается номинальным напряжением кабеля системы ПЭН, равным в настоящее время 52 кВ. В вычислениях использовались стандартные величины ёмкости кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена. Однако, при снижении ёмкости кабеля возможно увеличить предельную длину системы ПЭН для 100 и 200 Гц, см. Рисунок 6.



Рисунок 11. Сравнение необходимых сечений проводников кабеля в завис. от сопр. перем. тока



Вертикальный кабель

Система ПЭН в большинстве случаев запитывается через мощный силовой кабель (вертикальный кабель) от расположенного сверху источника и соединяющегося под водой с системой ПЭН силовыми кабелями. Опыт показывает, что худший случай в отношении температурных условий для кабелей возникает вблизи подвески, где вертикальный кабель находится в воздухе. Вертикальный кабель может располагаться внутри J-образной трубы, что приводит к ещё большему возрастанию температуры кабеля.

Система, работающая на частоте 50 Гц, требует больших сечений проводника (1600 мм²) для поддержания температуры кабеля ниже предела 90 °С для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (XLPE). При возрастании частоты ток в вертикальных кабелях существенно снижается и в результате тепловыделение и, следовательно, температура, становятся заметно меньше по сравнению со случаем 50 Гц. Уменьшение сечения медного проводника возможно для повышенной частоты без ограничения требуемого тока.

Другие аспекты

Эффект близости

Расположенные вблизи трубопроводы, стальные конструкции, вентили, обслуживающие линии, гибкие подводные кабели, пересекающие линии и т.д. будут подвержены влиянию электрических и магнитных полей, вызываемых трубопроводом с установленной системой ПЭН. Наведённые напряжения и ток необходи-



Таблица 3. Требования для 20" трубопровода длиной 10 км для поддержания содержимого трубы при температуре на 20°С выше температуры окружающей морской воды.

f (частота) [Гц]	50	100	200
I (ток питания) [А]	1250	990	760
I (ток на дальнем конце) [А]	1250	990	760
U (напряжение питания) [кВ]	3.7	6.0	9.2
P (суммарная потребл. мощность) [МВт]	1.3	1.4	1.4
cos (φ) (коэффициент мощности)	0.28	0.24	0.20
Сечение проводника кабеля [мм2]	800	550	400
Длина системы ПЭН [км]	10		



Таблица 4. Требования для 20" трубопровода длиной 10 км для поддержания содержимого трубы при температуре на 40°С выше температуры окружающей морской воды.

f (частота) [Гц]	50	100	200
I (ток питания) [А]	1760	1390	1070
I (ток на дальнем конце) [А]	1760	1390	1070
U (напряжение питания) [кВ]	5.2	8.5	13.1
P (суммарная потребл. мощность) [МВт]	2.6	2.8	2.8
cos (φ) (коэффициент мощности)	0.28	0.24	0.20
Сечение проводника кабеля [мм2]	1400	1000	800
Длина системы ПЭН [км]	10		



Таблица 5. Требования для 20" трубопровода длиной 30 км для поддержания содержимого трубы при температуре на 20°С выше температуры окружающей морской воды.

f (частота) [Гц]	50	100	200
I (ток питания) [А]	1250	980	760
I (ток на дальнем конце) [А]	1250	1070	1010
U (напряжение питания) [кВ]	11.3	18.9	33.2
P (суммарная потребл. мощность) [МВт]	3.9	4.3	4.7
cos (φ) (коэффициент мощности)	0.28	0.23	0.19
Сечение проводника кабеля [мм2]	800	650	800
Длина системы ПЭН [км]	30		



Таблица 6. Типичные длины ЗПТ с требуемыми количествами анодов. Трубопровод 20", обогреваемый ПЭН и общий коэффициент теплопередачи $U = 3 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$.

Частота	Длина ЗПТ	Количество анодов в ЗПТ
50 Гц	50 м	25
100 Гц	35 м	20
200 Гц	25 м	15

мо принимать в расчет для конкретной конфигурации поля чтобы гарантировать, что величины находятся в приемлемых пределах. Эти поля спадают с расстоянием от трубопровода с ПЭН и уменьшаются с повышением частоты. Таким образом, повышенная частота приводит к снижению ограничений, связанных с влиянием электрических и магнитных полей.

Конфигурация анодов для защиты от коррозии на переменном токе

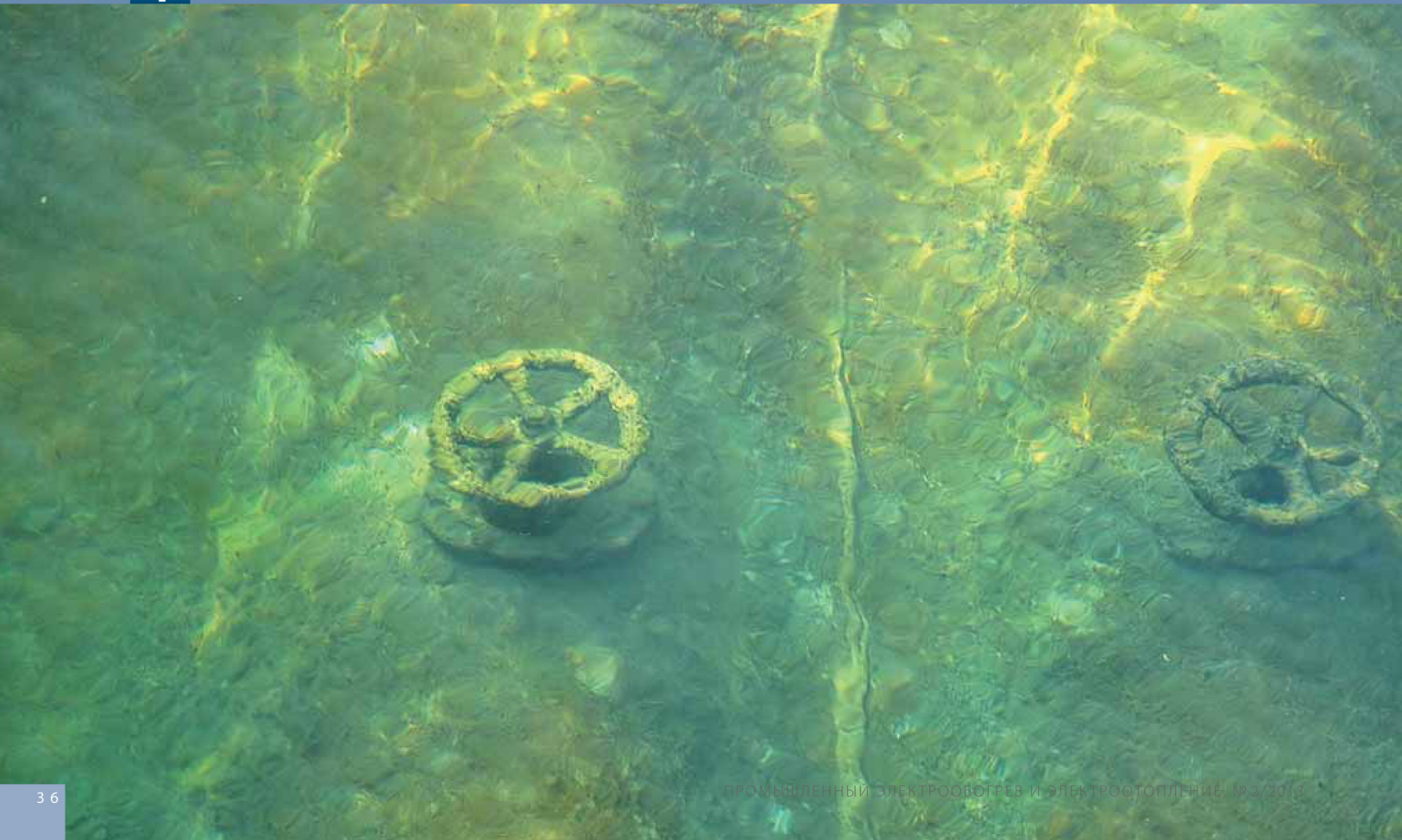
Дополнительные аноды требуются в зонах передачи тока (ЗПТ) у концов и вдоль трубопровода для поддержания передаваемого тока между металлической поверхностью и морской водой в допустимых пре-

делах. При 50 Гц эти пределы составляют типично 40 А/м^2 для алюминиевых анодов и 240 А/м^2 для стальных материалов [1]. Общепринято считать, что повышение частоты снижает риск коррозии на переменном токе так как электрохимические реакции могут в значительной степени блокироваться [6]. Таким образом, для повышенных частот, использование уровней, установленных для 50 Гц является консервативным приближением.

Оценка требуемого количества анодов в ЗПТ дана в Таблице 6 для площади анода около 1 м^2 для случая, представленного в Таблице 4 исходя из передаваемого тока 40 А/м^2 для анодов. Несколько дополнительных анодов включены для по-

крытия неравномерной токовой нагрузки между отдельными анодами. Как можно видеть, длина ЗПТ уменьшается приблизительно на 70% при 100 Гц и на 50% при 200 Гц. Это связано с уменьшенной глубиной проникновения в морскую воду и уменьшенным передаваемым током на повышенных частотах. Количество анодов уменьшается на 20% и 40% соответственно ввиду пониженной токовой потребности на более высоких частотах.

Вне зон передачи тока – вдоль основной части трубопровода, обогреваемого ПЭН – аноды расставлены через регулярные интервалы (типичное расстояние – 200 м). Для контроля обмена током между трубопроводом и морской водой важно учесть возможные небольшие различия импеданса отдельных соединений между собой участков трубопровода из разных партий. Измерения показали, что резистивная часть импеданса трубопровода может изменяться в пределах до 10%,



но при этом (основная) реактивная часть более или менее постоянна. Однако измерения также показали, что изменения импеданса трубопровода менее выражены на повышенных частотах. Это объясняется относительно большим возрастанием реактивной части, что означает, что вклад изменения резистивной части в изменение тока трубопровода при этом меньше.

Электрическая изоляция силового кабеля, уложенного поверх трубопровода

При возрастании частоты ускоряется старение полимера и скорость деградации свойств. Некоторые факторы действуют противоположно друг другу, т.е. температура может способствовать уменьшению водных триингов, но, с другой стороны, она увеличивает вероятность электрического триинга и «общее» старение материала. Представляется, что умеренное увеличение частоты с 50 до 100 Гц не влияет на де-

градацию до определённой степени. Работа кабелей погружных насосов на несколько более высоких частотах, чем 50 Гц, также поддерживает эту точку зрения. Тем не менее, это требуется подтвердить испытаниями.

Заключение

Рассмотрение работы систем прямого электронагрева (ПЭН) на повышенных частотах демонстрирует преимущества по сравнению с традиционными системами, работающими на 50/60 Гц. Основная выгода состоит в снижении требуемого тока, что однозначно связано с уменьшенным сечением медного проводника и, следовательно, меньшей стоимостью силовых кабелей. Кроме того, использование более лёгких кабелей становится более важным при освоении больших глубин, где вес вертикального кабеля может стать проблемой. Далее, поскольку коррозия по-видимому менее выражена на повышенных частотах, можно использовать более простую анодную систему, необходимую для заземления системы ПЭН. Результаты показывают, что выгоды от повышения частоты систем ПЭН действуют до длин от 10 до 30 км для 200 и 100 Гц соответственно. Однако, эти пределы могут быть расширены за счёт оптимизации конфигурации кабелей.

При увеличении частоты ток в вертикальных кабелях значительно уменьшается и, в результате, тепловыделение и, как следствие, температура существенно снижается по сравнению со случаем 50 Гц, не приводя к перегреву кабеля. Снижение сечения медного проводника возможно для повышенной частоты без ограничения требуемого тока.

Результаты, представленные в данной статье, базируются на теоретических вычислениях эффективности систем ПЭН, работающих на повышенных частотах питания. В основу этих вычислений положен опыт, полученный при работе установленных систем на 50/60 Гц. Внедрение систем ПЭН, работающих на повышенных ча-

i Пояснения к статье

Используемые в тексте перевода аббревиатуры:

ПЭН – прямой электронагрев = direct electrical heating – DEH

ЗПТ – зона передачи тока = current transfer zone - CTZ

WT – толщина стенки трубопровода
U-value – коэффициент теплопередачи, величина обратная термическому сопротивлению. Приведенное в статье значение 3 Вт/м²К, говорит о том, что подводные трубопроводы имеют довольно слабую тепловую изоляцию. Так у типовых предварительно изолированных пенополиуретаном труб диаметром 20" термическое сопротивление теплоизоляции примерно в 6 раз выше.

Данные, приведенные в таблицах 3,4 и 5, показывают, что для поддержания требуемых тепловых режимов нужны значительные линейные мощности. В системах, действующих на частоте 50 Гц, линейная потребляемая мощность равна 130 Вт/м для поддержания температурного перепада в 20°C. Собственно на нагрев трубы уходит 78 Вт/м (60%), а остальное на нагрев воды.

стотах, требует проверки в рамках программы испытаний для определения основных характеристик, коррозионных свойств и конструкции кабелей и оборудования. **П.Э**



Литература:

1. «Разработка технологии и опыт эксплуатации систем прямого электронагрева подводных трубопроводов». Труды Института Инженеров по Электротехнике и Электронике в области промышленных приложений, с. 118-129, том 43, № 1, январь 2007 г. / "Direct electrical heating of subsea pipelines technology development and operating experience". IEEE Transactions on Industry Applications, pp.118-129, vol. 43, no. 1, January, 2007.
2. «Электромагнитное моделирование электронагрева трубопроводов». HES-07. / "Electromagnetic modelling for electrical heating of pipelines". HES-07.
3. «Проверка концепции прямого нагрева нефте- и газопроводов». Документ CSO № 30466-01, 1997-04-23. / "Concept Verification Direct Heating of Oil & Gas Pipelines". CSO Document No. 30466-01, 1997-04-23.
4. Flux2D, версия 10.4, Cedrat France. (Компьютерная программа для двумерного анализа методом конечных элементов). / Flux2D, version 10.4, Cedrat France. (Computer software for 2D FEM analyses).
5. Бринс К.Дж., Лоуренсон П.Дж., Трьюбридж С.В (1994), «Аналитический и числовой расчет электрических и магнитных полей», Джон Уилей и Сыновья. / Binns, KJ, Lawrenson, PJ, Trowbridge, CW (1994), "The Analytical and Numerical Solution of Electric and Magnetic Fields", John. Wiley & Sons.
6. Национальная ассоциация инженеров-специалистов по коррозии, Международная публикация 35110 (2010). «Коррозия на переменном токе – современное состояние: Скорость коррозии, механизм и рекомендации по снижению». 2010.