

5. Gorjachkin V.Ju., Kornienko V.S. Intensivnost' korrozionnykh protsessov v utilizatsionnykh kotlakh pri szhiganii vodotoplivnykh emul'sii [Intensity of corrosion processes in exhaust gas boilers at burning water-fuel emulsion]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaja tekhnika i tekhnologija – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology*, 2013, no. 2, pp. 101-110. (Rus.)
6. Gorbov V.M., Gorjachkin A.V. Issledovanie intensivnosti korrozionnykh protsessov pri szhiganii vodomazutnykh emul'sii [Study of corrosion processes intensity during the combustion of water-fuel emulsions] *Zbirnyk naukovykh prac' UDMTU – The collection of scientific works USMTU*, 2005, no. 5 (391), pp. 87-95. (Ukr.)
7. Skorshelletti V.V. *Teoreticheskie osnovy korrozii metallov* [Theoretical foundations of metal corrosion]. St. Peterburg, Himija Publ., 1973, 264 p. (Rus.)
8. Tomashov N.D., Chernov G.P. *Passivnost' i zashhita metallov ot korrozii* [Passivity and protection of metals from corrosion]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 208 p. (Rus.)
9. Rabinovich D.I., Gorjachkin V.Ju. Issledovanie korrozii pri szhiganii sernistykh mazutov s malymi izbytkami vozdukh [Study of corrosion during burning of sulphurous fuel oils with low excess air]. *Elektricheskie stantsii – Electric stations*, 1970, no. 6, pp. 21-24. (Rus.)

Рецензент: О.В. Щедролосєв
д-р техн. наук, проф., ХФ НУК

Стаття надійшла 23.10.2018

УДК 621.18.192:662.94

doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160238

© Тендитный Ю.Г.¹, Тендитная Н.В.², Горячкин В.Ю.³,
Корниенко В.С.⁴

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА РАБОТЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА

Продолжение ресурса теплоэнергетического оборудования, который на данный момент – единственный выход из критического положения, дает значительный экономический эффект. Учитывая равномерный характер и низкую скорость низкотемпературной коррозии при сжигании водомазутных эмульсий с водосодержанием 30% в работе предложена методика оценки ресурса работы металла низкотемпературных поверхностей нагрева при температурах поверхности металла трубы выше 80°C, при которых наблюдается равномерная коррозия.

Ключевые слова: низкотемпературная поверхность нагрева, коррозия, ресурс работы, водомазутные эмульсии.

Тендітний Ю.Г., Тендітна Н.В., Горячкін В.Ю., Корнієнко В.С. Визначення ресурсу роботи низькотемпературних поверхонь нагріву. Продовження ресурсу теплоенергетичного обладнання, який на даний момент – єдиний вихід з критичного становища, дає значний економічний ефект. З огляду на рівномірний характер і низьку швидкість низькотемпературної корозії при спалюванні водомазутних емульсій з водовмістом 30% в роботі запропонована методика оцінки ресурсу роботи

¹ ст. преп., Херсонский филиал Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Херсон, nten.hfnuk@gmail.com

² ст. преп., Херсонский филиал Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Херсон, nten.hfnuk@gmail.com

³ канд. техн. наук, доцент, г. Херсон

⁴ преп., Херсонский филиал Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Херсон, kornienkovika1987@gmail.com

металу низькотемпературних поверхонь нагріву при температурах поверхні металу труби вище 60°C , при яких спостерігається рівномірна корозія. В опублікованих літературних джерелах практично відсутні дані про вплив на ресурс роботи низькотемпературних поверхонь нагріву одночасного впливу швидкостей корозії по газовій і водяній сторонах поверхонь нагріву. Достовірність висновку про надійність роботи трубних поверхонь нагріву, в значній мірі, залежить від обґрунтованості висновків, зроблених на базі розрахунків і особливо з урахуванням експериментальних даних процесів, що впливають на надійність. Саме на підставі результатів розрахунків можна виявити найбільш напружені елементи, які необхідно піддати детальному контролю. Тому від них, по суті, залежить надійність всієї методології оцінки досягнутого та залишкового ресурсу. У роботі представлена методика проведення розрахункових досліджень одночасного впливу корозійних процесів по газовій і водяній сторонах труб і порівняльної оцінки ресурсу роботи низькотемпературних поверхонь нагріву при досягненні граничних станів металу при допустимому і граничних значеннях напружень і мінімально можливої товщини стінки труби під впливом газохімічного і водохімічного режимів з урахуванням даних експериментальних досліджень процесів, що впливають на надійність роботи. Для визначення часу розрахункового та залишкового ресурсу роботи металу, що знаходиться під впливом рівномірної корозії, представлена методика визначення мінімальної залишкової товщини металу, при якій ще забезпечується гранично допустима середня по залишковій товщині стінки труби напруга.

Ключові слова: низькотемпературна поверхня нагріву, корозія, ресурс роботи, водомазутні емульсії.

Yu.G. Tenditniy, N.V. Tenditna, V.Yu. Goryachkin, V.S. Kornienko. Determination of the work life of low-temperature heating surfaces. Prolongation of heat and power equipment resource, which for the time being, is the only way out of the critical situation, gives a significant economic effect. Considering the uniform nature and low rate of low-temperature corrosion when burning water-fuel emulsions with water content of 30%, method for estimating service life of metal low-temperature heating surfaces at pipe metal surfaces temperature above 60°C has been proposed, at which uniform corrosion is observed. In the published literature, there are practically no data of impact on service life of low-temperature heating surfaces simultaneous influence of corrosion rates on gas and water sides of heating surfaces. The reliability of conclusion about the reliability of pipe heating surfaces largely depends on validity of conclusions made on the basis of calculations and especially taking into account experimental data of processes affecting reliability. It is on the basis of calculation results that it is possible to identify most tense elements that need to be subjected to detailed control. Therefore, in essence, reliability of entire methodology for assessing achieved and remaining resources depends on them. The paper presents a method for conducting computational studies of simultaneous influence of corrosion processes on gas and water sides of pipes and comparative assessment of service life of low-temperature heating surfaces when the limit states of metal are reached at acceptable and limit values of tensions and minimum possible thickness of pipe wall under influence of gas-chemical and water-chemical regimes and considering the data of experimental studies of processes affecting the reliability of work. To determine the time of calculated and residual service life of metal under uniform corrosion, a method for determining minimum residual thickness of metal has been presented, which still provides predestructive maximum allowable tension for remaining pipe wall thickness.

Keywords: low-temperature heating surface, corrosion, service life, water-fuel emulsions.

Постановка проблеми. При сжигании сернистых мазутов при температурах стенки t_{cm} низкотемпературных поверхностей нагрева (НТПН) ниже $130...140^{\circ}\text{C}$ вследствие конденсации паров серной кислоты резко усиливается (больше 1 мм/год) низкотемпературная серноокислотная коррозия (НТК). Поэтому при этих t_{cm} не применяются конденсационные поверхности и отсутствуют рекомендации по оценке ресурса их работы. При сжигании водомазутных эмуль-

сий (ВМЭ) на их основе скорость НТК в области t_{cm} , равной 70...140°C, существенно снижается в области «кислотного пика», вследствие чего появляется возможность установки конденсационных НТПН. В связи с этим актуальной становится проблема определения ресурса работы НТПН, а также диапазона t_{cm} и водосодержания ВМЭ, при которых обеспечивается надежность работы при допустимом значении скорости НТК ниже 0,25 мм/год.

Анализ последних исследований и публикаций. При сжигании стандартных сернистых топлив при нормативных избытках воздуха и указанных условиях по температуре стенки имеет место существенный рост скорости НТК (до 1,1...1,2 мм/год в области кислотного пика при $t_{cm} \approx 110^\circ\text{C}$) [1-3]. Как показали проведенные исследования [4-6], сжигание водомазутных эмульсий (ВМЭ) с водосодержанием до 25...30% с содержанием серы от 0,7 до 2% с коэффициентами избытка воздуха от 1,25 до 1,5 позволяет снизить скорость НТК до 0,15...0,25 мм/год не только в области «кислотного пика», но и в пределах температур НТПН от температуры точки росы паров серной кислоты (130...150°C) и до 70...80°C. Меняется характер электрохимической НТК: вместо язвенной и питтинговой коррозии наблюдается равномерная по окружности и незначительная по величине коррозия. Это подтверждается двухгодичной эксплуатацией котлов КВГ-34 К при сжигании ВМЭ с 30% воды [7]. Такой характер НТК позволяет повысить надежность и долговечность НТПН (воздухоподогревателя, экономайзера) при одновременном повышении КПД вспомогательных и энергетических котлов на 10% и глубину утилизации выхлопных газов ДВС и ГТД от 45 до 75% [4].

При проведении расчетов прочности согласно требованиям Регистра или ОСТ к расчетной толщине стенки трубы, которая определяется при допустимых напряжениях, принятых с запасом, еще прибавляется прибавка на коррозию в пределах ~1 мм, которая не может компенсировать влияние коррозионного процесса при температурах стенки трубы t_{cm} ниже температуры точки росы H_2SO_4 $t_{p\text{H}_2\text{SO}_4}$ в течение нормативных 100000 часов, т. к. скорость НТК при сжигании стандартных топлив при $t_{cm} < t_{p\text{H}_2\text{SO}_4}$ находится на уровне 1,2 мм/год. Следовательно, нормативы расчетов не предусматривают использование конденсационных НТПН. При сжигании ВМЭ с $W^r = 30\%$ скорость НТК в течение 1000 часов находится на уровне 0,15 мм/год, т. е. технологическая надбавка в ~1 мм также не обеспечивает расчетный ресурс в 100000 часов. Если при этом учесть прохождение коррозии по водяной (или воздушной стороне в газовых воздухоподогревателях), то практически невозможно обеспечить нормативный ресурс работы НТПН без ремонтов или замены низкотемпературной части трубной поверхности. Поэтому необходимо рассмотреть влияние на ресурс работы коррозионных процессов с определением их скоростей по обеим сторонам труб.

Цель работы – разработка методики определения ресурса работы трубчатых конденсационных НТПН при принятых или допустимых скоростях НТК при сжигании ВМЭ с водосодержанием W^r от 2 до 30% при располагаемых остаточных толщинах стенки труб δ , при которых возможна эксплуатация под воздействием потока газов снаружи труб (газохимический режим – ГХР) и коррозии по внутренней стороне трубы (водо- или воздухо-химический режим) – ВХР.

Изложение основного материала. По результатам проведенных экспериментальных исследований [4-6] построена номограмма (рис. 1) для определения ресурса работы τ_p НТПН по зависимостям скорости коррозии K (при времени воздействия потока газов 1000 часов) от водосодержания ВМЭ от 2 до 30% при значениях $t_{cm} = 60...150^\circ\text{C}$ при располагаемых или остаточных толщинах стенки трубы $\delta = 1...4$ мм. При этом τ_p определяется по принятому в практике расчетов отношению толщины стенки δ (мм) к величине скорости коррозии K (мм/год). Поэтому в этом случае не учитываются возникающие в металле трубы напряжения.

Исходная толщина стенки трубы $\delta_{исх}$ определяется по формулам при исходном внутреннем диаметре трубы $D_g^{исх}$ и наружном диаметре $D_n^{исх}$ с учетом технологической надбавки c .

$$\delta_{исх} = \frac{p \cdot D_g^{исх}}{2 \cdot \sigma_p \cdot \varphi - p} + c \quad \text{или} \quad \delta_{исх} = \frac{p \cdot D_n^{исх}}{2 \cdot \sigma_p \cdot \varphi + p} + c.$$

Расчетное среднее значение напряжений σ_p находится по специальным таблицам с учетом прочностной характеристики металла согласно расчетным значениям температуры металла t_{cm} и давления p , уменьшенным на коэффициент запаса прочности. Поэтому уже в процессе

проектирования заложен определенный ресурс работы τ металла, который зависит от скорости коррозии K и может быть определен по формуле $\tau = \frac{\delta_{исх}}{K}$ (рис. 2, а).

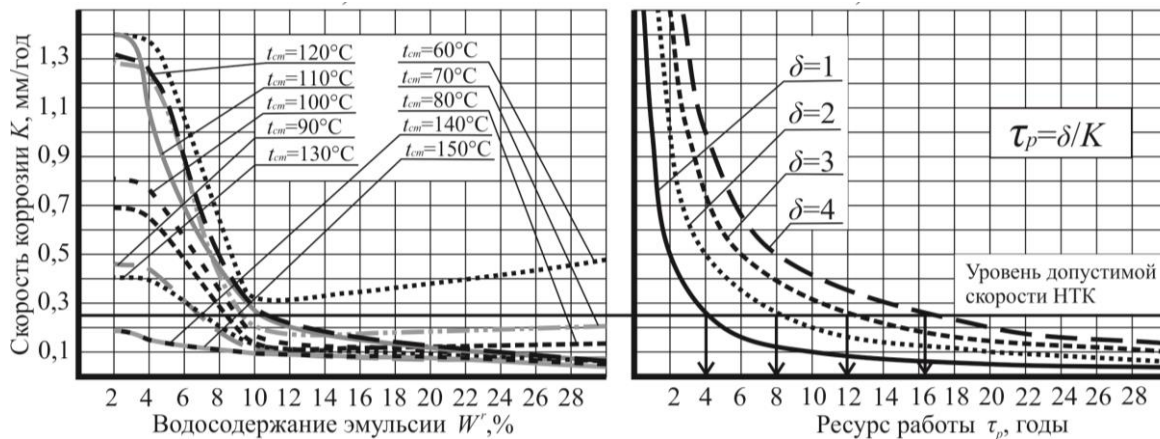


Рис. 1 – Номограмма для определения ресурса работы поверхности нагрева по зависимости скорости НТК от водосодержания ВМЭ при разных t_{cm} при исходной толщине стенки $\delta = 1, 2, 3, 4$ мм

Если рассматривается вариант воздействия только ГХР, то $\delta_{исх}$ со временем уменьшается на $\delta_{ГХР}$ под воздействием коррозии (рис. 2, б), и максимально допустимое напряжение $[\sigma]$ предразрушаемого состояния металла трубы будет наблюдаться при достижении $[\delta]$, расположенной ближе к внутренней поверхности труб. Поэтому $[\delta]$ удобнее определять, используя значение внутреннего исходного диаметра трубы $D_в^{исх}$. Тогда

$$[\delta] = \frac{p \cdot D_в^{исх}}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - p}$$

В этом случае значение реального (номинального) ресурса работы металла будет равно

$$\tau_p = \frac{\delta_{ост}}{K_{ГХР}} = \frac{\delta_{исх} - [\delta]}{K_{ГХР}} = \frac{\delta_{ГХР}^{max}}{K_{ГХР}}$$

где $K_{ГХР}$ – скорость коррозии под воздействием ГХР, мм/год; $\delta_{ГХР}^{max}$ – максимальная толщина стенки трубы, которая может быть подвергнута воздействию ГХР до достижения $[\sigma]$ металла, мм.

Следовательно, в случае равномерной коррозии, которая наблюдается при сжигании ВМЭ [7] с водосодержанием $W' = 30\%$, при ГХР (рис. 2, б) величина τ_p зависит от скорости коррозии, исходной толщины стенки трубы $\delta_{исх}$ и $[\delta]$, которое можно уменьшить, понижая внутреннее давление в трубе и (или) повышая $[\sigma]$ путем понижения температуры металла или заменой марки стали.

Для построения зависимости изменения текущего значения напряжения металла $\sigma_{тек}$ от изменения остаточной толщины металла (рис. 3) использовались формулы:

$$\sigma_{тек} = \frac{p \cdot (D_n^{тек} - \delta_{ост}^{тек})}{2 \cdot \delta_{ост}^{тек} \cdot \varphi} \quad \text{или} \quad \sigma_{тек} = \frac{p \cdot (D_в^{исх} + \delta_{ост}^{тек})}{2 \cdot \delta_{ост}^{тек} \cdot \varphi}$$

где $D_n^{тек}$ – текущее уменьшающееся значение наружного диаметра под воздействием ГХР; $\delta_{ост}^{тек}$ – текущее уменьшающееся значение исходной толщины стенки под воздействием ГХР; φ – коэффициент прочности (для труб принимается $\varphi = 1$).

Удобнее использовать последнюю формулу, т. к. для режима ГХР значения $D_в^{исх}$ не меняются. Величина $\delta_{ост}^{тек}$ определялась по формуле

$$\delta_{ост}^{mek} = \delta_{исх} - n \cdot K_{ГХР},$$

где скорость коррозии $K_{ГХР}$ под воздействием ГХР, которая принимается по результатам экспериментальных исследований, или равное принимаемому прогнозируемому значению 0,2 мм/год, а значение n (годы) принимались равными 1, 2, 3 и т. д., пока $\delta_{ост}^{mek}$ не достигнет, например, 0,05 мм, при котором будут наблюдаться напряжения, приводящие к разрушению металла (при $\sigma_{mek} \geq [\sigma]$).

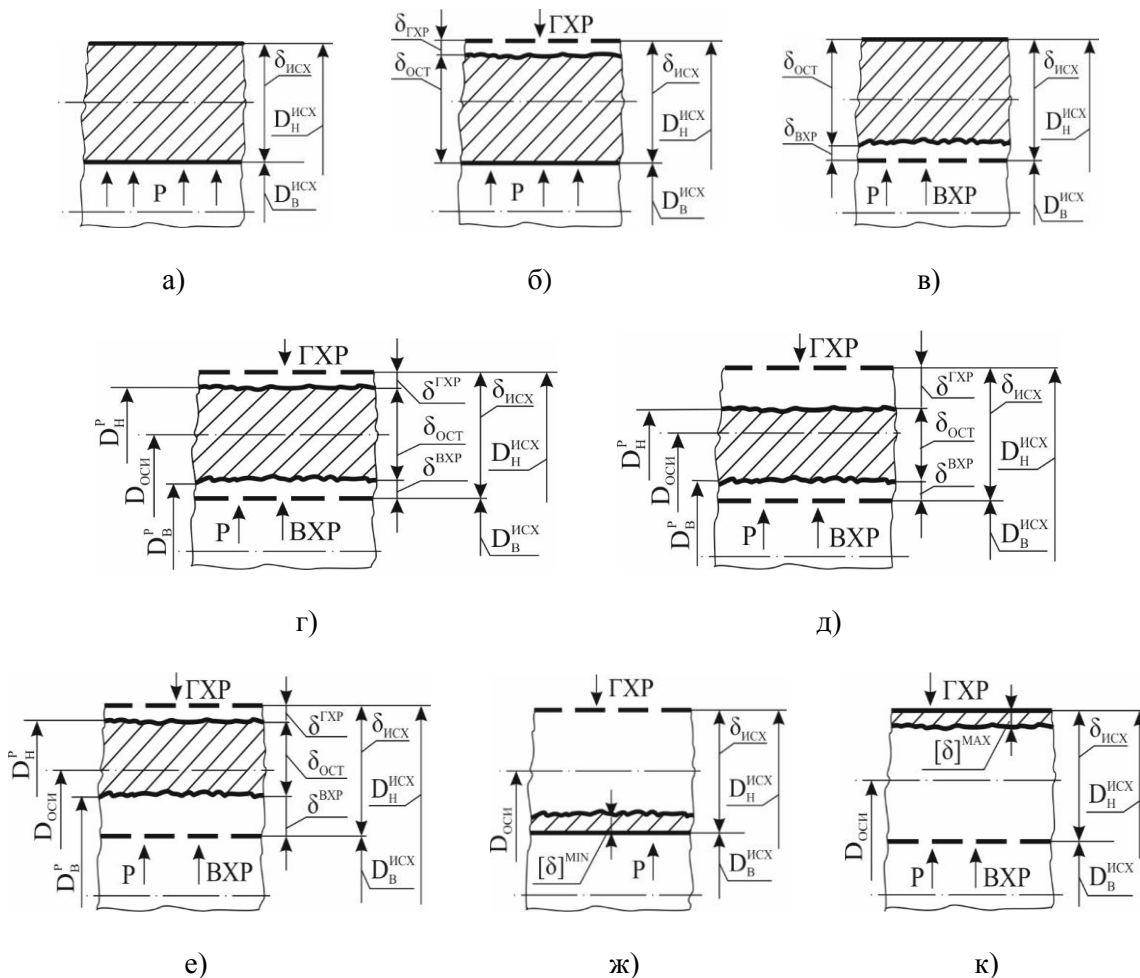


Рис. 2 – Расчетные схемы состояния и расположения остаточной толщины стенки трубы δ при равномерной коррозии: а) – исходное состояние стенки (до коррозионного воздействия сред); б) – при воздействии ГХР; в) – при воздействии ВХР; г) – при одновременном воздействии ГХР и ВХР (скорости коррозии под воздействием ГХР и ВХР одинаковые); д) – при одновременном воздействии ГХР и ВХР (скорость коррозии под воздействием ГХР выше, чем при ВХР); е) – при одновременном воздействии ГХР и ВХР (скорость коррозии под воздействием ВХР выше, чем при ГХР); ж) – предельная минимально допустимая толщина стенки трубы при воздействии ГХР; к) – предельная минимальная толщина стенки трубы при ВХР

Если рассматривается вариант влияния на σ_{mek} уменьшения толщины стенки трубы под воздействием только ВХР (рис. 2, в), то в этом случае максимальные напряжения будут наблюдаться при утонении стенки в сторону $D_н^{исх}$, которое не меняется, и поэтому

$$[\delta] = \frac{p \cdot D_н^{исх}}{2 \cdot [\sigma] - p}.$$

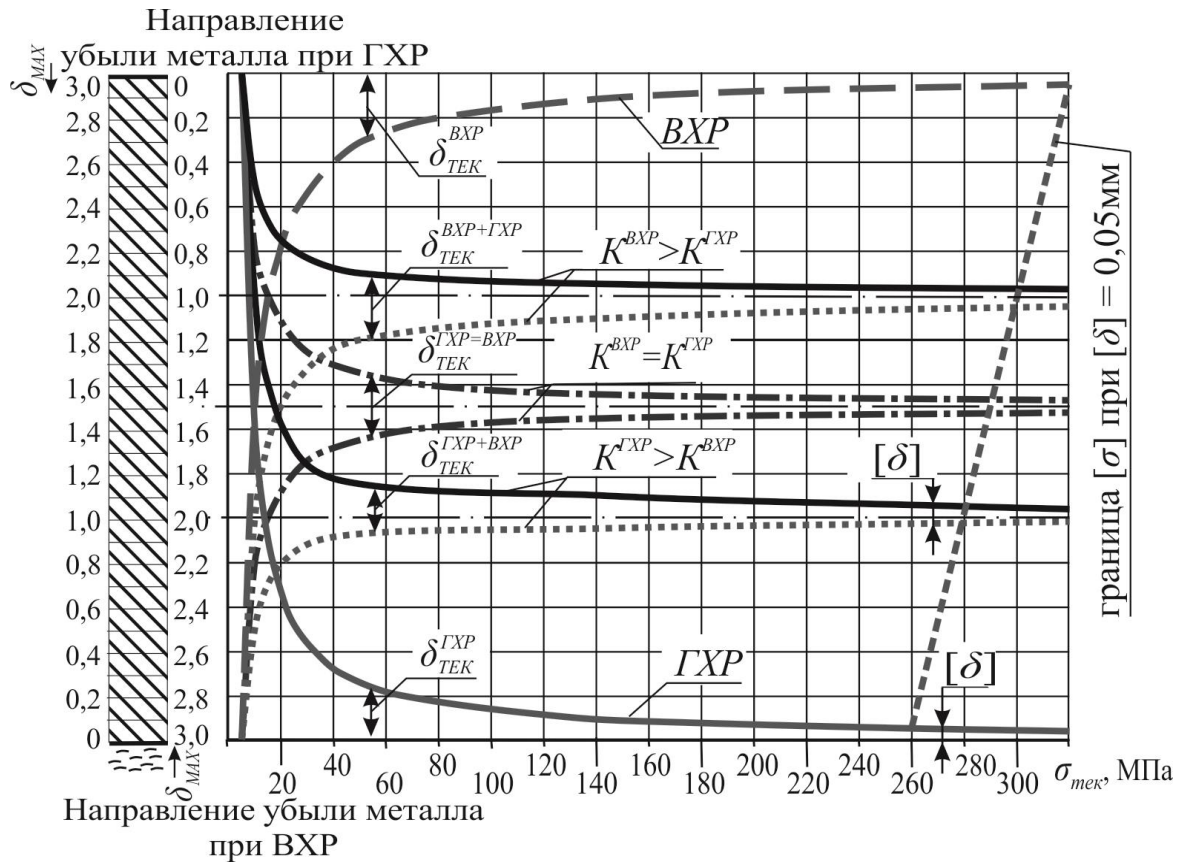


Рис. 3 – Распределение текущих значений напряжений $\sigma_{тек}$ при изменении толщины стенки трубы δ_{min} под воздействием ГХР и ВХР

Для построения зависимости влияния на $\sigma_{тек}$ изменения текущего значения остаточной толщины стенки трубы $\delta_{ост}^{тек}$ под воздействием ВХР удобнее воспользоваться формулой

$$\sigma_{тек} = \frac{p \cdot (D_n^{ucx} - \delta_{ост}^{тек})}{2 \cdot \delta_{ucx}^{тек} \cdot \varphi},$$

где $\delta_{ост}^{тек} = \delta_{ucx} - n \cdot K_{ВХР}$.

Значение $K_{ВХР}$ принималось равным 0,1 мм/год, а $n = 1, 2, 3$ и т. д., пока значение будет равным, например, $\delta_{ост}^{тек} = 0,05$ мм, при котором металл будет разрушаться (при достижении $[\sigma]$).

При одновременном прохождении коррозионных процессов под влиянием ГХР с внешней стороны трубы и ВХР внутри трубы решение задачи становится сложнее, так как в зависимости от соотношения скоростей коррозии $K_{ГХР}$ и $K_{ВХР}$ необходимо находить месторасположение $\delta_{ост}$, $\delta_{ост}^{тек}$ и $[\delta]$ в пределах зоны толщины трубы δ_{ucx} (то есть надо находить расположение оси симметрии $D_{осн}$) с учетом допустимых значений $\sigma_{тек}$ и $[\sigma]$, что дает возможность получить распределение $\sigma_{тек} = f(\delta_{тек})$.

В случае равенства скоростей $K_{ГХР}$ и $K_{ВХР}$ (рис. 2, г) расположение оси симметрии эпюры напряжений находится просто

$$D_{осн} = \frac{D_n^{ucx} + D_в^{ucx}}{2} = D_в^{ucx} + \delta_{ucx} = D_n^{ucx} - \delta_{ucx}.$$

Перед началом проведения расчетных исследований распределения $\sigma_{тек} = f(\delta_{тек})$ необходимо найти крайние значения допустимого значения $[\delta]^{max}$, расположенного при D_n^{ucx} (область максимума коррозии при ВХР), $[\delta]^{min}$ при $D_в^{ucx}$ (область максимума коррозии при ГХР),

при которых обеспечивается предельное значение $[\sigma]$ (рис. 2, ж, к)

$$[\delta]^{max} = \frac{p \cdot D_n^{ucx}}{2 \cdot [\delta] \cdot \varphi + p} \text{ и } [\delta]^{min} = \frac{p \cdot D_n^{ucx}}{2 \cdot [\delta] \cdot \varphi - p}.$$

Для получения зависимости $\sigma_{тек} = f(\delta_{тек})$ необходимо использовать расчетные текущие значения

$$D_n^p = D_{оси} - \delta_{ост}^{тек} \text{ и } D_n^p = D_{оси} + \delta_{ост}^{тек},$$

а также

$$\sigma_{тек} = \frac{p \cdot (D_n^{ucx} - \delta_{ост}^{тек})}{2 \cdot \delta_{ucx}^{тек} \cdot \varphi} \text{ или } \sigma_{тек} = \frac{p \cdot (D_n^{ucx} + \delta_{ост}^{тек})}{2 \cdot \delta_{ucx}^{тек} \cdot \varphi},$$

где $\delta_{ост}^{тек} = \delta_{ucx} - (\delta_k^{ГХР} + \delta_k^{ВХР})$ при $\delta_k^{ГХР} = \delta_k^{ВХР} = n \cdot K_{ГХР} = n \cdot K_{ВХР}$ ($n = 1, 2, 3$ года и так далее).

При расчетном исследовании, когда $K_{ГХР} > K_{ВХР}$ (рис. 2, д), положение $D_{оси}$, вдоль которой будет располагаться эпюра $\sigma_{тек}$ или $(\delta_{ост}^{тек})$, необходимо определять с учетом соотношения скоростей коррозии $K_{ГХР}$ и $K_{ВХР}$. Поэтому значение $D_{оси}$ находится по формулам

$$D_{оси} = D_6^{ucx} + 2 \frac{\delta_{ucx} K_{ВХР}}{K_{ГХР} + K_{ВХР}} \text{ или } D_{оси} = D_n^{ucx} - 2 \frac{\delta_{ucx} K_{ГХР}}{K_{ГХР} + K_{ВХР}}.$$

В связи с тем, что $K_{ГХР} > K_{ВХР}$, то относительно $D_{оси}$ значения остаточной толщины стенки $\delta_{ост}^{тек}$ и напряжений $\sigma_{тек}$ распределятся не симметрично, а пропорционально соотношению скоростей коррозии $K_{ГХР}$ и $K_{ВХР}$. Рассмотрим вариант, когда $\delta_{ост}^{тек}$ будет равно $[\delta]$ при $[\sigma]$. При принятых геометрических размерах $K_{ГХР} = 0,2$ мм/год; $K_{ВХР} = 0,1$ мм/год

$$[\delta]_{ост} = [\delta]_{ГХР+ВХР} = [\delta]^{min} + \frac{([\delta]^{max} - [\delta]^{min}) K_{ВХР}}{K_{ВХР} + K_{ГХР}}.$$

В этом случае по данным рис. 2, д

$$\delta_{ост}^{тек} = [\delta]_{ГХР+ВХР} = \delta_{ост}^{ГХР} + \delta_{ост}^{ВХР},$$

с учетом соотношения $K_{ГХР}$ и $K_{ВХР}$

$$\delta_{ост}^{ГХР} = \frac{[\delta]_{ГХР+ВХР}}{K_{ГХР} + K_{ВХР}} \cdot K_{ГХР} \text{ и } \delta_{ост}^{ВХР} = \frac{[\delta]_{ГХР+ВХР}}{K_{ГХР} + K_{ВХР}} \cdot K_{ВХР}.$$

Для проверки точности результатов расчетов необходимо определить время ресурса работы металла для вариантов (при воздействии $K_{ГХР}$ и $K_{ВХР}$). Для этого сначала находим расчетные значения D_n^p и D_6^p с привязкой к $D_{оси}$

$$D_n^p = D_{оси} + 2[\delta]_{ост}^{ГХР}; \quad D_6^p = D_{оси} - 2[\delta]_{ост}^{ВХР}.$$

Тогда толщина стенки трубы, которая подвергается воздействию ГХР, будет равна

$$\delta_k^{ГХР} = \frac{D_n^{ucx} - D_n^p}{2}, \text{ а } \tau_p^{ГХР} = \frac{\delta_k^{ГХР}}{K_{ГХР}}.$$

Со стороны воздействия ВХР

$$\delta_k^{ВХР} = \frac{D_6^{ucx} - D_6^p}{2}, \text{ а } \tau_p^{ВХР} = \frac{\delta_k^{ВХР}}{K_{ВХР}}.$$

Если $\tau_p^{ГХР} = \tau_p^{ВХР}$, то, следовательно, расчеты выполнены верно.

Для получения зависимости $\sigma_{тек} = f(\delta_{тек})$ осуществляются аналогичные расчеты с учетом соотношения скоростей $K_{ГХР}$ и $K_{ВХР}$ и соответствующего распределения $\delta_{ост}^{тек}$ на $\delta_{ост}^{ГХР}$ и $\delta_{ост}^{ВХР}$ (рис. 2, д).

При выполнении расчетных исследований, когда $K_{ГХР} > K_{ВХР}$ (рис. 2, е) при определении $D_{оси}$, вдоль которой будут располагаться и распределяться кривые $\sigma_{тек}$ и $\delta_{ост}^{тек}$, необходимо

учитывать соотношение значений $K_{ГХР}$ и $K_{ВХР}$.

Положение $D_{оси}$ находится по уравнению

$$D_{оси} = D_{г}^{ucx} + 2 \frac{\delta_{ucx} K_{ГХР}}{K_{ГХР} + K_{ВХР}} \text{ или } D_{оси} = D_{н}^{ucx} - 2 \frac{\delta_{ucx} K_{ГХР}}{K_{ГХР} + K_{ВХР}}.$$

Для варианта расчета, когда $K_{ВХР} > K_{ГХР}$, определяются значения $[\delta]_{ГХР+ВХР}$ при принятых, например, $K_{ГХР} = 0,2$ мм/год и $K_{ВХР} = 0,1$ мм/год.

$$[\delta]_{ГХР+ВХР} = [\delta]^{min} + \frac{([\delta]^{max} - [\delta]^{min}) K_{ВХР}}{K_{ВХР} + K_{ГХР}}.$$

По данным (рис. 2, е) с учетом принятых соотношений $K_{ГХР}$ и $K_{ВХР}$ значения $[\delta]_{ГХР+ВХР}$ по отношению к оси ($D_{оси}$) определяются следующим образом

$$[\delta]_{ГХР+ВХР} = [\delta]_{оси}^{ГХР} + [\delta]_{оси}^{ВХР},$$

$$[\delta]_{оси}^{ГХР} = \frac{[\delta]_{ГХР+ВХР}}{K_{ГХР} + K_{ВХР}} \cdot [\delta]_{оси}^{ГХР}; [\delta]_{оси}^{ВХР} = \frac{[\delta]_{ГХР+ВХР}}{K_{ГХР} + K_{ВХР}} \cdot [\delta]_{оси}^{ВХР}.$$

Для проверки точности определения указанных значений определяются расчетные значения диаметров $D_{н}^p$ и $D_{г}^p$ с привязкой к $D_{оси}$ и время ресурса работы металла τ_p для этих условий

$$D_{н}^p = D_{оси} + 2[\delta]_{оси}^{ГХР}; D_{г}^p = D_{оси} - 2[\delta]_{оси}^{ВХР}.$$

$$\text{Тогда } \delta_{к}^{ГХР} = \frac{D_{н}^{ucx} - D_{н}^p}{2}, \tau_p^{ГХР} = \frac{\delta_{к}^{ГХР}}{K_{ГХР}}, \delta_{к}^{ВХР} = \frac{D_{г}^{ucx} - D_{г}^p}{2}, \tau_p^{ВХР} = \frac{\delta_{к}^{ВХР}}{K_{ВХР}}.$$

Если $\tau_p^{ГХР} = \tau_p^{ВХР}$, то расчеты выполнены верно.

При этом необходимо отметить, что в случае, когда $K_{ВХР} > K_{ГХР}$, расчетный ресурс работы металла до достижения $[\delta]$ при $[\sigma]$ меньше, что объясняется «перемещением» в конце коррозионного процесса остаточных толщин металла в область больших значений диаметра, т. е. к $D_{н}$.

Распределение текущих значений напряжений $\sigma_{тек}$, рассчитанных при изменяющейся толщине стенки от δ_{ucx} до $\delta_{оси}$ при разных соотношениях скоростей коррозии $K_{ГХР}$ и $K_{ВХР}$, представлено на рис. 3.

При оценке ресурса работы металла необходимо выяснить условия и минимальные значения $[\delta]$ при максимальных $[\sigma]$, при которых металл будет разрушаться [8].

Выводы

1. Построена номограмма для нахождения ресурса работы τ_p в зависимости от скорости коррозии, температуры стенки $t_{ст}$ и водосодержания эмульсии.
2. При сжигании ВМЭ с водосодержанием W^r больше 12% скорость НТК находится ниже допустимого уровня 0,25 мм/год.
3. Применение ВМЭ с водосодержанием $W^r = 30\%$ обеспечивает скорость НТК на уровне 0,1 мм/год при температурах стенки выше 80°C.
4. Разработана методика определения τ_p и текущих значений толщины стенки трубы и напряжений при разных вариантах воздействия коррозии при наружной и внутренней сторонам труб.

Список использованных источников:

1. Гринь Е.А. Надёжность и безопасность тепловых электростанций. Особенности современного этапа / Е.А. Гринь, В.В. Котельников, В.И. Бочкарев // Электрические станции. – 2016. – № 7. – С. 2-12.
2. Внуков А.К. Теплохимические процессы в газовом тракте паровых котлов / А.К. Внуков. – М. : Энергоиздат, 1981. – 296 с.
3. Магадеев В.Ш. Коррозия газового тракта котельных установок / В.Ш. Магадеев. – М. :

Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.

4. Горбов В.М. Исследование интенсивности коррозионных процессов при сжигании водомазутных эмульсий / В.М. Горбов, А.В. Горячкин // Збірник наукових праць УДМТУ / УДМТУ. – Миколаїв, 2003. – № 5 (391). – С. 87-95.
5. Горячкин В.Ю. Обеспечение надежности работы судовых котлов при сжигании водотопливных эмульсий / В.Ю. Горячкин, А.В. Горячкин, Ю.Г. Тендитный // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2009. – № 1. – С. 166-173.
6. Пат. 99408 Україна, МПК С 23 F 11/10, F 22 В 37/00, F 23 J 15/00. Спосіб захисту металу низькотемпературних поверхонь нагріву котла від сірчаноокислотної корозії / В.Ю. Горячкин, А.В. Горячкин, О.В. Акімов, В.О. Іутінський, В.С. Корнієнко. – № а201110299; заявл. 23.08.11; опубл. 10.08.12, Бюл. № 15.
7. Эксплуатация производственных котлов КВГ-34К на водотопливной эмульсии / Ю.В. Якубовский [и др.] // Рыбное хозяйство. – 1991. – № 3. – С. 57-60.
8. Гринь Е.А. Возможности механики разрушения применительно к задачам прочности, ресурса и обоснования безопасной эксплуатации тепломеханического энергооборудования / Е.А. Гринь // Теплоэнергетика. – 2013. – № 1. – С. 25-32.

References:

1. Grin' E.A., Kotel'nikov V.V., Bochkarev V.I. Nadezhnost' i bezopasnost' teplovykh elektrostantsii. Osobennosti sovremennogo etapa [Reliability and safety of thermal power plants. Features of the cotemporary phase]. *Elektricheskie stantsii – Electric stations*, 2016, no. 7, pp. 2-12. (Rus.)
2. Vnukov A.K. *Teplokhimicheskie protsessy v gazovom trakte parovykh kotlov* [Thermochemical processes in the gas path of steam boilers]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1981, 296 p. (Rus.)
3. Magadeev V.Sh. *Korroziia gazovogo trakta kotel'nykh ustanovok* [Corrosion of the gas path of boiler plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986, 272 p. (Rus.)
4. Gorbov V.M., Goriachkin A.V. Issledovanie intensivnosti korrozionnykh protsessov pri szhiganii vodomazutnykh emul'sii [Investigation of corrosion processes intensity during the combustion of water-fuel emulsions]. *Zbirnyk naukovykh prac' UDMTU – The collection of scientific works USMTU*, 2003, no. 5 (391), pp. 87-95. (Rus.)
5. Gorjachkin, V.Ju., Gorjachkin A.V., Tenditnyj Ju.G. Obespechenie nadezhnosti raboty sudovykh kotlov pri szhiganii vodo-toplivnyh jemul'sij [Ensuring the reliability of ship boilers when burning water-fuel emulsions]. *Naukovii visnik Khersons'koï derzhavnoï mors'koï akademii – The scientific bulletin of Kherson state maritime academy*, 2009, no. 1, pp. 166-173. (Rus.)
6. Gorjachkin V.Ju., Gorjachkin A.V., Akimov O.V., Iutins'kij, V.O. Kornienko V.S. *Sposib zahistu metalu niz'kotemperaturnih poverhon' nagrivu kotla vid sirchanokislotnoï korozii* [Method of metal protecting of boiler low-temperature heating surfaces from sulfuric acid corrosion]. Patent UA, no. 99408, 2012. (Ukr.)
7. Yakubovsky Yu.V., Sumenkov V.M., Seleznev Yu.S. Ekspluatatsiya proizvodstvennykh kotlov KVG-34K na vodotoplivnoi emul'sii [Operation of production boilers KVG-34K on water-fuel emulsion]. *Rybnoe khoziaistvo – Fisheries*, 1991, no. 3, pp. 57-60. (Rus.)
8. Grin' E.A. *Vozmozhnosti mekhaniki razrusheniia primenitel'no k zadacham prochnosti, resursa i obosnovaniia bezopasnoi ekspluatatsii teplomekhanicheskogo energooborudovaniia* [Possibilities of fracture mechanics in relation to the tasks of strength, resource and justification of the safe operation of thermal and mechanical power equipment]. *Teploenergetika – Power Engineering*, 2013, no. 1, pp. 25-32. (Rus.)

Рецензент: Б.М. Политыкин
д-р техн. наук, проф., ХФ НУК

Статья поступила 15.10.2018