

значення параметра потоку відмов для проектування систем газопостачання із поліетиленових труб можна прийняти для газопроводів $1 \cdot 10^{-3} 1/(\text{км} \cdot \text{рік})$. З метою попередження аварійності та підвищення надійності систем газопостачання України необхідне створення спільно з іншими регіональними компаніями газопостачання масиву даних щодо потоку відмов на газопроводах із поліетиленових труб.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Табак М. Системи газопостачання України: динаміка розвитку / М. Табак // Инженерные сети из полимерных материалов (ИСПМ). – 2005. – №4(14). – с. 12-15.
2. Ионин А.А. Газоснабжение /А.А. Ионин // – М.: Стройиздат, 1989. – 439с.
3. ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения». М.: МНТК «Надежность машин». 1988. – 58с.
4. NTSB; National Transportation Safety Board, Safety Report: Transportation Safety Databases, Washington, D.C., 2002.
5. NEB, National Energy Board Canada; Focus on Safety; A comparative Analysis of Pipeline Safety Performances; April, 2005.
6. EGIG; European Gas Pipeline Incident data Group4 5th EGIG report 1970-2001: EGIG document 02.R.0058, issued December 2002.
7. Parloc 2001 – The update of Loss of Containment Data for Offshore Pipelines, Prepared by Mott MacDonald for the Health and Safety Executive, the UK offshore Operators Association and the Institute of Petroleum, 2003.
8. APIA; The Australian Pipeline industry associate; Conference presentations accessible from the APIA web site.
9. National Gas Distribution: All Reported Incident Details: 1993-2012, web site: primis.phma.dot.gov/comm./report/safety.
10. Michael M. Mamoum. Plastic Pipe Failure, Risk, and Threat Analysis / Michael M. Mamoum, Julie K. Maupin, Michal J. Miller // – Gas Technology Institute, 2009. – 337p.
11. Сухарев М.Г. Статистический анализ аварийности газораспределительных систем /М.Г. Сухарев, А.Г. Лапица, Э.В. Калинина // Территория нефтегаз. – 2010. – №4. – с. 16-19.

УДК 669.184

Андоньев В.С., Дяченко С.В., Гладкоскок В.П.

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

К ВОПРОСУ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ

Под сверхкритическими тепловыми потоками мы будем подразумевать такие тепловые потоки, при которых существующие методы охлаждения не могут поддерживать температуру стенки детали, обеспечивающую длительную ее работу. Величина их для металлургических агрегатов достигает $6-10 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ и более.

Разработкой систем охлаждения и вопросами исследования, сопутствующие высоким тепловым потокам и природе кризисов теплообмена посвящены многие исследования.

Нужно отметить, что возникновение кризиса теплообмена неразрывно связано с гидродинамическим режимом течения жидкости при её кипении, поэтому эти два явления очень тесно переплетаются и рассматриваются обычно совместно.

Проведено много экспериментальных и теоретических разработок, посвященных исследованию процессов теплопередачи при различных режимах кипения.

Академик С.С. Кутателадзе (1-3) выдвинул гипотезу о гидродинамической природе кризисов в механизме кипения жидкостей. В соответствии с этой гипотезой кризис наступает тогда, когда пограничный слой становится неустойчивым, увеличивается насыщенность его паром у поверхности нагрева, что затрудняет проникновение к ней жидкости, т.е. происходит гидродинамическая перестройка пограничного слоя, вследствие которой его структура нарушается, и нагреваемая поверхность полностью покрывается слоем пара.

Проанализировав уравнение движение и механического взаимодействия потоков двух фаз, С.С. Кутателадзе получил

формулу для определения критического теплового потока:

$$q_{кр} = k\tau\sqrt{\rho''g^4\sqrt{G}(\rho' - \rho'')}$$

где $q_{кр}$ – величина критического теплового потока, Вт/м²; k – безразмерный коэффициент, равный 0,14; τ – скрытая теплота парообразования, кДж/кг; g – ускорение силы тяжести, м/сек²; G – коэффициент поверхностного натяжения, кг/м; ρ' и ρ'' – соответственно плотности воды и пара на линии насыщения, кг/м³.

Однако, следует отметить, что эта зависимость справедлива только для условий кипения жидкости в большом объёме. При вынужденном движении жидкости и пароводяной смеси изучение явления возникновения кризиса кипения значительно осложняется.

Большое влияние на значение критического теплового потока имеет скорость движения охлаждающей жидкости. Однако, даже при практически совпадающих параметрах потока отмечаются существенные расхождения в величинах q критического.

Известно, что если к входному сечению канала присоединить расширитель, заполненный упругой (сжимаемой) средой, то возникает пульсационный режим течения, при котором критический тепловой поток снижается.

Экспериментально исследовано влияние $\frac{\ell}{d}$ и ℓ на критический тепловой поток. Согласно результатам этих исследований величина критического теплового потока уменьшается с увеличением длины трубы (ℓ). Увеличение значения $\frac{\ell}{d}$ приводит к усилению пульсационного течения, при котором, как полагают, величина критического теплового потока мала.

В результате всего вышеизложенного можно заключить, что теплообмен при больших тепловых потоках (вблизи кризиса кипения) является весьма неустойчивым. В самом деле, как только возникает плёночное кипение, даже на малых участках охлаждаемых поверхностей, резко ухудшается процесс теплоотдачи, происходит перегрев стенки и может наступить

её разрушение. Для предотвращения аварийного режима во многих высокотеплонагруженных устройствах, охлаждаемых пузырьковым кипением, используют так называемый эффект кипения жидкости на неизотермических поверхностях.

Он основывается на том, что теплонагруженную поверхность оребряют, при этом возникновение плёночного режима кипения на наиболее нагретых участках (у основания ребер) ведет к смещению зоны максимальной теплоотдачи к вершине ребер. При этом отводимый тепловой поток увеличивается. Устойчивость теплообмена сохраняется до тех пор, пока интенсивное парообразование не достигнет вершины ребер. Благодаря этому происходит как бы затягивание кризиса теплообмена. Установлено, что у основания ребра наблюдается плёночный режим кипения, на части ребра, расположенной ближе к его вершине, идёт обычный процесс пузырькового кипения, а на средней его части наблюдается нестабильный режим, характерный тем, что с какой – то частотой от вершины ребра на этот участок набегает водяная плёнка, а с противоположной стороны (на среднюю часть ребра) затем распространяется паровая плёнка. Визуально хорошо виден этот своеобразный колебательный процесс между двумя характерными режимами кипения. Следует отметить, что коэффициент теплоотдачи на участке ребра с нестабильной теплоотдачей выше, чем среднеарифметическое значение этой величины для первого и второго кризисов теплообмена при кипении.

Несмотря на успешное применение таких устройств в некоторых областях техники для снятия тепловых потоков, превышающих критические значения, до настоящего времени не предложены методы инженерных расчётов таких оребренных, не установлена оптимальная конфигурация ребер, не предложены формулы для расчёта коэффициентов теплоотдачи при кипении на всех трёх участках неизотермической поверхности. Поэтому пока внедрить этот способ охлаждения не удалось.

В настоящее время одним из наиболее эффективных методов интенсификации процессов теплообмена является плёночное охлаждение. Опытами установлено, что при кипении жидкости в плёнке достигаются наиболее высокие значения коэффициентов теплоотдачи.

В зависимости от физических свойств орошающей жидкости и газовой фазы, соприкасающейся с ней, на наружной поверхности плёнки возникают сложные явления интенсивности испарения жидкости при отсутствии кипения. Процесс теплоотдачи в этом режиме весьма интенсивен. Теоритические и экспериментальные исследования представляют большой интерес, но они, как правило, посвящены проблемам движения жидкой плёнки при конденсации пара, взаимодействии с газовой и ли паровой фазами, т.е. изучению процесса плёночного охлаждения для защиты поверхностей от теплового потока со стороны горячей струи газа (ракетные двигатели).

Очень интересные исследования проведены сотрудниками МЭИ в области охлаждения высокотеплонагруженных поверхностей тонкими плёнками, однако, размеры охлаждаемой поверхности нагрева в этих исследованиях были очень малы, а опыты проводились в условиях вакуума. Поэтому данные этих научных разработок не могут быть использованы для проектирования систем испарительного охлаждения высокотеплонагруженных деталей металлургических агрегатов.

О.А. Кремневым и А.Л. Сатановским (4) предложен и разработан способ воздушно-водоиспарительного охлаждения, который с успехом применяется во многих отраслях промышленности. Сущность этого способа состоит в том, что увлажнённый воздух, содержащий водяной пар и мелкодисперсную влагу, подаётся в элементы оборудования, которые требуют охлаждения. Однако, до сих пор не было реальных попыток для использования газо-водяной смеси для охлаждения высокотеплонагруженных элементов металлургических агрегатов, хотя сами авторы рекомендовали использовать этот способ – воздушно-водоиспарительное охлажде-

ние в металлургической промышленности, но в основном при проведении ремонтных работ и для ускоренного принудительного охлаждения отливок.

В настоящее время разработан способ охлаждения водовоздушной смесью кристаллизаторов установок непрерывной разливки стали. Как отмечают авторы, использование этого способа позволили бы значительно повысить коэффициент теплоотдачи по сравнению с водяным охлаждением (примерно 40%) и одновременно увеличить равномерность процесса охлаждения. В этих исследованиях скорости водовоздушной смеси достигали 2–2,8 м/с, а максимальные тепловые потоки не превышали $0,5 \cdot 10^6$ Вт/м².

Все исследователи, работающие в области отвода тепла из зоны действия высоких тепловых потоков, отмечают большие трудности как физического, так и конструктивного характера, возникающие при снятии этих потоков, нередко превышающих критические значения. До настоящего времени кардинального решения вопроса в этом направлении нет. Не исключением является и чёрная металлургия, где процессы, связанные с получением металла, сопровождаются выделением огромных количеств тепла на охлаждаемых поверхностях. В таких устройствах величины тепловых потоков достигают $3–5 \cdot 10^6$ Вт/м², а локальные потоки зачастую превышают $10 \cdot 10^6$ Вт/м² (воздушные и шлаковые фурмы доменных печей, фурмы сталеплавильных агрегатов, холодильники, горна и лещади доменных печей при подходе к их поверхности жидкого чугуна) (5,6).

До настоящего времени не предложены достаточно простые и в то же время надёжные методы охлаждения деталей, подверженным таким интенсивным тепловым воздействиям. В результате прогар деталей и остановка агрегатов для их замены становится узаконенным явлением.

Защита деталей при таких тепловых нагрузках ведётся сейчас в основном за счёт применения огнеупорных материалов, увеличения толщины стенок деталей, что способствует растечке теплового потока, а также за счёт изменения технологи-

ческого режима для создания гарнисажных футеровок. Однако все эти мероприятия в большинстве случаев не достигают желаемого эффекта, и металлурги считают прогары теплонагруженных деталей нормальным эксплуатационным явлением.

В особо тяжёлых условиях находятся фурмы доменных печей. Работая в зоне максимальных температур, они подвергаются периодическому попаданию на охлаждаемую поверхность продуктов плавки с температурой, превышающую 1500°C . Величины средних тепловых потоков на фурму составляет $0,3-0,6 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$, а в момент попадания жидкого чугуна на их поверхность они возрастают в десятки раз и могут превышать $10 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$.

Такое резкое возрастание нагрузки связано с как очень высокими значениями коэффициентов теплоотдачи, так и с ударным действием струи жидкого металла.

В современных сталеплавильных агрегатах – мартеновских печах и конвекторах - процесс плавки интенсифицируется за счёт продувки ванны кислородом, при этом дутьевые фурмы опускаются непосредственно в ванну с жидким расплавом.

Частота попадания жидкого чугуна на поверхность фурм определяется, прежде всего, физическими свойствами шлака, зависящими от его химического состава и теплового режима агрегата (7). На стойкость фурм большое влияние оказывает способ подвода охлаждающей воды. Её подача осуществляется с помощью трубки произвольного диаметра, недоходящий до носка фурмы. В зависимости от длины трубки и конфигурации носка фурмы наблюдается различная гидродинамика потока жидкости в полости охлаждения, благодаря которой некоторые части фурмы ненадёжно снабжаются водой, появляются «мёртвые зоны», в которых скорость воды значительно меньше, чем в других частях фурмы.

Ухудшению процесса способствует также выпадение накипи на внутренние поверхности стенок фурмы. Качество охлаждаемой воды имеет большое значение в виду того, что, несмотря на относительно большой расход воды, подаваемого на одну фурму ($15-20 \text{ м}^3/\text{час}$), и небольшой её нагрев ($15-20^{\circ}\text{C}$), отвод тепла от стенок осуществляется за счёт поверхностного кипения. Поэтому наличие солей жесткости приводит к неизбежному их отложению на стенках фурмы, что также влечёт за собой падения коэффициента теплоотдачи, т.е. наступает резкое ухудшение отвода тепла и сокращения срока службы фурм.

Выводы

В результате изложенного можно сделать вывод, что процессы охлаждения высокотеплонагруженных поверхностей связаны со значительными трудностями, особенно при выплавке стали и чугуна, поэтому разработка новых способов охлаждения имеет большое значение, как для повышения стойкости конструкции, так и для улучшения качества выплаваемого металла.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – 5-е изд. М.: Атомиздат, 1979.
2. Кутателадзе С. С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. – М.: Энергия, 1976.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – 3-е изд., перераб. М.: Наука, 1986.
4. Кремнев О. А., Сатановский А. Л. Воздушно-водоиспарительное охлаждение оборудования – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1967. – 240 с.
5. Марков В.Л. «Методы продувки мартеновской ванны». – М.: «Металлургия», 1988.
6. Воскобойников В.Г. и др. – Общая металлургия – 6 изд., перераб. и доп. М.: ИКЦ «Академкнига» 2004. – 774 стр.
7. Кудрин В.А. – Теория и технология производства стали: Учебник для вузов. М.: «Мир» ООО «Издательство АСТ» 2003. – 528 стр.