

Введение В строительстве газораспределительных сетей полиэтиленовые трубы (ПЭ) заняли уже довольно прочные позиции. В тоже время их применение в северных регионах представляется наиболее проблематичным и сдерживается, главным образом, действующими нормативными документами. Прочность сварного соединения во многом определяется температурным режимом в процессе сварки. Температурное поле в конце нагрева и скорость охлаждения свариваемых труб на этапе осадки оказывают существенное влияние на формирование надмолекулярной структуры материала сварного шва и, соответственно, прочность соединения. При сварке полиэтиленовых труб в условиях низких температур окружающего воздуха (ОВ) динамика температурного поля не обеспечивает необходимую прочность сварного шва. Для расширения диапазона температур ОВ, при котором допускается проведение сварки полиэтиленовых труб, практически не используются методы управления динамикой температурного поля. Регулирование температурным режимом и обеспечение такого же температурного поля при оплавлении и такого же темпа охлаждения при осадке, как и при допустимых температурах ОВ позволит провести сварку полимерных труб при температурах ОВ ниже нормативных без изменения основных параметров сварки (давления на торцы, технологической паузы, величины и скорости осадки). Математическая модель теплового процесса сварки полиэтиленовых труб. Для решения проблемы регулирования динамики температурного поля необходимо привлечение методов математического моделирования. В то же время, существующие математические модели недостаточно адекватно описывают тепловой процесс при сварке. В большинстве работ, посвященных данной теме, тепловой процесс при сварке полимерных труб исследуют, используя одномерное уравнение теплопроводности. При таком моделировании не учитываются особенности теплового процесса при сварке полимерных труб. На этапе осадки часть расплавленного материала выдавливается наружу, образуя грат, и свариваемые трубы укорачиваются. В существующих математических моделях теплового процесса при сварке влияние образовавшегося грата на температурное поле не учитывается. Не учитывается также уменьшение длины трубы на величину осадки, что препятствует использованию подобных моделей для решения задач регулирования температурного режима. В связи с этим актуальным является разработка математической модели теплового процесса при сварке полиэтиленовых труб, учитывающей основные процессы, влияющие на температурный режим, и расширение на ее основе диапазона допустимых температур окружающего воздуха для сварки. Пренебрегая конвективной теплопроводностью в воздухе внутри трубы, тепловой процесс сварки описывается двумерным уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах: $\Delta T = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$ (1) где $T(r,z,t)$ - температура в момент времени t ; $c(T)$ - коэффициент теплоемкости; $\rho(T)$ - удельная плотность; $\lambda(T)$ - коэффициент

теплопроводности; t_m - время расчета; r, z - цилиндрические координаты; Γ - свободная поверхность грата и части трубы. Индекс $i=1$ для твердой фазы материала трубы; $i=2$ для жидкой фазы материала трубы; $i=3$ для воздуха. Распределение температуры в трубе в начальный момент времени однородно и равно температуре окружающего воздуха: . (2) На одном торце задается температура нагретого инструмента: . (3) Учитывая низкую теплопроводность полиэтилена, примем, что на некотором удалении $z = l$ от зоны сварки температура трубы не изменяется на протяжении всего времени протекания процесса. Таким образом, на другом торце трубы задается условие: (4) На внешней поверхности трубы происходит конвективный теплообмен с окружающей средой: (5) При $r = 0$ условие ограниченности решения: (6) На границе фазового перехода записывается условие Стефана: , (7) где $F(r,z,t)$ - уравнение положения границы раздела фаз в момент времени t ; T_F - температура фазового перехода; L - удельная теплота фазового перехода. В полиэтилене не существует такой четко выраженной границы, фазовый переход происходит в интервале температур. В случае фазового перехода в интервале температур в математической модели необходимо учитывать промежуточную фазу между твердым и жидким веществом [2]. Границы промежуточной фазы определяются температурами солидуса и ликвидуса. В работе [2, 3] температурное поле в этом случае предлагается определять из уравнения теплопроводности с эффективным коэффициентом теплоемкости: (8) где , (9) - объемная доля твердой фазы. При предположении прямой пропорциональности объема расплавленного полиэтилена количеству выделившейся теплоты, определяется по формуле: , (10) где - зависимость теплового потока от температуры, регистрируемая дифференциальным сканирующим калориметром, отнесенная к единице массы вещества. Задача (1)-(10) решалась численно методом сглаживания коэффициентов. Алгоритм сквозного счета строился с использованием чисто неявных схем. Получающиеся при этом нелинейные трехточечные уравнения решались методом итераций, решения на каждой итерации находились методом прогонки [4]. Разработанные алгоритмы реализованы в виде комплекса программ в среде «Delphi». Предварительный подогрев при сварке полиэтиленовых труб при низких температурах. Возможности существующей технологии контактной тепловой сварки полиэтиленовых труб используются недостаточно полно. При сварке в условиях низких температур не используется теплота, сохранившаяся при воздействии нагревательным инструментом. В ранее проведенных исследованиях предлагается следующая технология сварки без предварительного подогрева [5, 6]. Основная идея этого подхода заключается в увеличении продолжительности воздействия нагревательным инструментом для обеспечения необходимого объема расплава и использовании теплоизоляционной камеры при охлаждении. Продолжительность нагрева определяется на основе расчета нестационарного

температурного поля в свариваемых трубах из условия соответствия границы проплавления значению, рекомендуемому для сварки труб при допустимой температуре окружающей среды. Размер теплоизоляционной камеры определяется расчетным путем из условия обеспечения такого же темпа охлаждения, что и при допустимых температурах окружающего воздуха. Многочисленные механические испытания показывают, что кратковременная прочность такого соединения не уступает прочности соединения, полученного в условиях нормативных температур. При ускоренных испытаниях в поверхностно-активной среде образцов, полученных при сварке при температурах ниже нормативных без предварительного подогрева и охлаждения в теплоизоляционной камере, наблюдались случаи преждевременного разрушения по зоне сплавления. Предполагается, что причиной такого разрушения являются повышенные значения температурных напряжений, вследствие неравномерного нагрева. Отметим, два возможных последствия повышенных напряжений. Во-первых, известно, что прочное сварное соединение получается, если в зоне сплавления сварного соединения формируются образования сферолитной, а не ленточной структуры. При оптимальных технологических режимах сварки ленточные образования, сформированные при вытеснении расплава из зоны сплавления в грат, вследствие релаксации расплава трансформируются в сферолитные. Формирование ленточной структуры в зоне сплавления связывают с повышением температуры кристаллизации деформируемых полимерных расплавов [7]. При определенных напряжениях и температурах ленточная структура может сохраниться вследствие ранней кристаллизации расплава даже при обеспечении скорости охлаждения, соответствующей сварке при допустимых температурах ОБ. Во-вторых, согласно расчетам, приведенным в работе [8], напряжения, обусловленные сваркой, повышаются с понижением температуры окружающего воздуха. Максимальные напряжения возникают в зоне сплавления. При сварке без предварительного подогрева в условиях низких температур при увеличении продолжительности воздействия нагревательным инструментом и получении необходимого объема расплава свариваемые трубы подогреваются на небольшое расстояние от стыка. Неоднородность распределения температуры по длине трубы способствует повышению напряжений в зоне сплавления, которые не могут релаксировать и могут привести к зарождению и распространению в этой зоне трещин. В связи с этим можно предположить, что для получения прочного сварного соединения при температурах воздуха ниже нормативных следует подогреть до допустимой температуры трубу на некоторое расстояние от торца, обеспечить однородность распределения температуры для снижения напряжений и провести нагрев торцов по регламентированному технологическому режиму. Расчетная схема стенки трубы с нагревателем представлена на рис. 1. Предполагая однородность

температурного поля по окружности полиэтиленовой трубы, рассмотрим отрезок его стенки длиной N с нагревателем и эластичным элементом толщиной N_1 , обеспечивающей идеальный тепловой контакт соприкасающихся поверхностей. Нагреватель обеспечивает постоянную температуру T_n на внешней поверхности эластичного элемента, поэтому изменение температуры в нагревателе не рассчитывается. Значение T_n меньше температуры плавления полиэтилена. Рис. 1 - Схема стенки трубы 1 с нагревателем 3 и эластичным элементом 2 В области G , ограниченной свободными поверхностями стенки трубы и эластичного элемента запишем уравнение теплопроводности: (11) На внешней границе эластичного элемента Z задана постоянная температура: (12) На свободных поверхностях стенки и эластичного элемента C происходит конвективный теплообмен с окружающей средой с температурой T_0 : (13) На правом конце стенки, на удалении, котором нагреватель практически не изменяет температуру стенки, зададим температуру окружающей среды: (14) В начальный момент времени в стенке трубы и эластичном элементе распределение температуры однородно и равно температуре O_B : (15) Индекс $i=1$ для полиэтилена, $i=4$ для эластичного материала. Задача решалась методом конечных разностей сведением задачи к цепочке одномерных и использованием однородной разностной схемы со вторым порядком аппроксимации по пространственным переменным. Граничные условия вида (13) аппроксимировали со вторым порядком. Численное моделирование проводилось для трубы ПЭ 100 ГАЗ SDR 9 110'12,3. Расчеты проводились при следующих данных: $r_1 = 0,0416$; $r_2=0,055$ м; $\lambda_1=0,38$; $\lambda_2=0,29$ Вт/(кг•К); $\rho_1=954$; $\rho_2=700$ кг/м³; $c_1=1900$; $c_2=1900$ Дж/(кг•К). Длина подогреваемой области нагревательного инструмента равнялась 6,5 см. Температура окружающего воздуха минус 40 °С. При подогреве инструментом через определенное время температура в стенке трубы становится равной температуре инструмента по толщине и по длине части трубы. Для удаления инструмента предварительного подогрева и приведения труб в контакт с другим нагревательным инструментом необходимо некоторое время, за которое прогретая часть остывает. Поэтому температура инструмента для подогрева специально выбирается 60 °С, что выше допустимой для сварки температуры O_B , но ниже температуры размягчения. Продолжительность подогрева выбирается таким образом, чтобы распределение температуры стенки трубы стало неоднородным по радиальной переменной. Такой прием позволяет сделать достаточно длительную паузу для обеспечения более однородного распределения температуры (выравнивания) в допустимом для сварки диапазоне. На рис. 2 представлено полученное расчетным путем изменение температуры по толщине стенки трубы на различном расстоянии от торца после 90 секунд подогрева. Конец трубы подогревается на расстояние, не превышающее длины нагревательного инструмента. Поскольку торец трубы также подогревается, в этой области температура близка к температуре

инструмента. Расчетами получена продолжительность выравнивания равная 190 секундам. На рис. 2 представлено распределение температуры в стенке трубы в конце паузы. Распределение температуры стало более однородным и значения температуры находятся в допустимом диапазоне, что позволяет провести стыковую сварку в стандартном режиме. За температуру окружающего воздуха при проведении сварки можно выбрать среднюю температуру в прогретой части трубы. Тогда параметры технологического режима сварки (температура рабочей поверхности нагретого инструмента, продолжительность нагрева, время нарастания давления осадки, время охлаждения) определяются по таблицам [1]. Как видно из расчетов за температуру окружающего воздуха можно принять температуру равную 20 °С. Тогда дальнейший технологический процесс сварки ПЭ труб происходит как при допустимых температурах. Согласно [1] продолжительность нагрева торцов труб при температуре ОВ равной 20 °С составляет 100 с. Рис. 2 - Распределение температуры в стенке трубы по радиусу: 1-3 -соответственно расстояние от торца 0,01; 0,03; 0,06 м; 1'-3' - в момент завершения подогрева (90 с); 1''-3'' - в момент завершения выравнивания (190 с) Анализ распределения температуры по длине трубы в некотором радиусе (рис. 3) показал, что при проведение предварительного подогрева температурное поле (кривая 1) в зоне сварки становится идентичным температурному полю при температуре ОВ 20 °С (кривая 2). Как видно из рис. 3 при проведении сварки по стандартной технологии при температуре ОВ -40 °С без предварительного подогрева (кривая 3) температурное поле в трубе не достигает необходимого уровня. Рис. 3 - Распределение температуры по длине трубы в момент завершения этапа нагрева (100 с), радиус трубы 0,0483 м: 1- $T_0 = -40$ °С с подогревом, 2 - $T_0 = 20$ °С, 3 - $T_0 = -40$ °С без подогрева Охлаждение сварного соединения в теплоизоляционной камере. Определение размера теплоизоляционной камеры После оплавления (нагрева) кромок свариваемых труб следует этап осадки. Этап осадки наиболее важный процесс при тепловой сварке встык полиэтиленовых труб, формирующий сварное соединение. При осадке свариваемые детали оплавленными поверхностями сближаются под давлением, создавая физический контакт. В результате сближения оплавленных торцов часть оплавленного материала вытекает наружу, образуя грат. При медленном охлаждении расплава формируется крупнокристаллическая структура материала, наличие которой увеличивает склонность полиэтилена к хрупкому разрушению [9]. Осадка при температурах воздуха ниже регламентируемых приводит к возрастанию скорости охлаждения сварного соединения. Слишком быстрое охлаждение вызывает в зоне сварки значительные внутренние напряжения, которые не успевают сглаживаться до того, как к швам прикладывается дополнительные монтажные нагрузки [9]. Также при слишком быстром охлаждении процесс кристаллизации может оборваться на промежуточной стадии, тогда как при формировании структуры в

условиях медленного охлаждения разрушившиеся центры кристаллизации успевают восстанавливаться [10]. Поэтому регулирование скорости охлаждения при температурах воздуха ниже регламентируемых является актуальной проблемой. Пренебрегая продолжительностью технологической паузы и временем, затрачиваемым на течение расплава при осадке, труба считается укороченной на величину осадки. Для упрощения расчетов принимается допущение, что поперечное сечение образующегося грата имеет прямоугольную форму. Для величины осадки 2,6 мм поперечное сечение бралось в форме прямоугольника со сторонами 3,3 и 5,3 мм. Начало координат по длине трубы z смещалось на величину осадки и ставилось на месте стыка труб. В начале процесса охлаждения распределение температуры в грате предполагается равномерным. Значение температуры в грате определяется из условия теплового баланса - равенства количеств теплоты в области уходящей в грат и в образовавшемся грате. Таким образом, распределение температуры в трубе с гратом в начале процесса охлаждения получается в результате определения температурного поля в конце нагрева. Несмотря на то, что в расчетах пренебрегается продолжительностью технологической паузы, предполагается, что при отделении нагревательного инструмента от свариваемых труб и смыкании оплавленных деталей температура воздуха внутри трубы становится равной температуре окружающего воздуха и вновь повышается за счет теплоотдачи от нагретой части трубы на стадии охлаждения. При этом постановка задачи аналогична этапу нагрева, но условие (3) на одном торце изменяется на условие отсутствия теплового потока (условие симметрии температурного поля) в режиме охлаждения: . (16) На свободной поверхности грата задается условие конвективного теплообмена с окружающим воздухом. Для расчета использовались те же обозначения и исходные данные, что и для нагрева. Так как скорость охлаждения увеличивается с понижением температуры ОВ, предлагается использование цилиндрической камеры. Размеры камеры определяются на основе теоретического моделирования процесса охлаждения сварного соединения с теплоизоляционной камерой из условия обеспечения допустимой скорости охлаждения. Примем следующие допущения: предполагается, что температура воздуха внутри камеры достаточно быстро (в пределах расчетного шага по времени) становится однородной, камера может быть изготовлена из тонкой пленки с очень низкой теплопроводностью ($\lambda=0,0001$), тогда толщиной стенки камеры можно пренебречь. Учитывая эти допущения температуру в камере находим из соотношений: , (17) , (18) где - объем камеры, - температура в камере на нижнем временном шаге, T - температура в камере, α_k - коэффициент теплообмена в камере, K - внешняя поверхность грата и части трубы, находящейся внутри теплоизоляционной камеры. Осредненная температура в камере, полученная в результате расчета, зависит от геометрических размеров теплоизоляционной камеры. Расчеты

показывают, что увеличение длины камеры при фиксированной высоте способствует снижению температуры в камере, что соответствует физическому представлению. При этом увеличивается не только объем камеры, но и увеличивается поверхность трубы с более низкой температурой, что приводит к снижению температуры в теплоизоляционной камере. Однако, увеличение высоты (радиуса) камеры при фиксированной длине также способствует снижению температуры воздуха внутри камеры, но не столь значительно. Поэтому, принимая во внимание возможности изготовления и практическое использование теплоизоляционной камеры, один из геометрических размеров, например, высоту можно зафиксировать и, варьируя длиной камеры, определить размер камеры, обеспечивающий допустимую скорость охлаждения сварного соединения. При высоте камеры равной 0,03 м расчетами найдена полудлина камеры $L/2$ равная 0,03 м, обеспечивающая допустимую скорость охлаждения в интервале низких температур ОВ (-45, -15) °С. Характерные зависимости температуры от времени при охлаждении сварного соединения в теплоизоляционной камере при различных температурах ОВ приведены на рис. 4. Для сравнения показаны полученные расчетами предельные кривые изменения температур по времени при температурах ОВ -15 и 45 °С (кривые 2, 1 соответственно) при охлаждении соединения в естественных условиях, а также изменение температуры по времени при температуре ОВ -40 °С при естественном охлаждении (кривая 5). Зависимость температуры по времени при охлаждении соединения в теплоизоляционной камере лежит между предельными кривыми. Рис. 4 - Изменение температуры по времени в точке (0,0553; 0,001) при различных температурах ОВ, (1-3, 5) - без камеры, 4 - с камерой: 1- 45 °С; 2 - -15 °С; 3 - 20 °С; 4 - -40 °С с подогревом; 5 - -40 °С без подогрева

Заключение Разработана математическая модель теплового процесса сварки полиэтиленовых труб учитывающая фазовый переход в интервале температур. Разработан алгоритм определения продолжительности предварительного подогрева при сварке полиэтиленовых труб при низких температурах окружающего воздуха. Разработана математическая модель теплового процесса охлаждения сварного соединения с учетом теплового воздействия грата и формоизменения труб. Разработана методика определения размеров теплоизоляционной камеры, обеспечивающей допустимую скорость охлаждения сварного соединения полиэтиленовых труб.