

## ТЕПЛОПЕРЕНОС ОТ ГРУНТА К ЖИДКОЙ ФАЗЕ СУГ ПРИ ЕЕ НАГРЕВЕ В РЕЖИМЕ ХРАНЕНИЯ В ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕГАЗИФИКАТОРАХ (ВНУТРЕННЯЯ ЗАДАЧА)

Предложенные автором [1] геотермальные регазификаторы (ГТР) для газоснабжения потребителей сжиженным углеводородным газом (СУГ), представляют собой вертикальные скважины, укрепленные стальными трубами диаметром от 300 до 800 мм, глубиной  $H = 50 \dots 60$  м. Нижний торец затопонирован бетонной пробкой. На верхнем конце трубы, выступающем над земной поверхностью, и до глубины промерзания почвы устраивается тепловая изоляция. Сверху на трубу устанавливается штатный оголовок (редукционная головка) с необходимой трубной обвязкой и устройствами, обеспечивающими безопасное и удобное выполнение технологических операций при эксплуатации.

ГТР перед началом работы и затем периодически, по мере его опорожнения, заполняется жидкой фазой СУГ от специальных автомашингазовозов (АЦЖГ). При этом ГТР заполняются максимально на 9/10 их вместимости, так что в верхней части трубы остается полость для паровой фазы, защищенная от конденсации вследствие охлаждения в холодное время года.

Нагрев в режиме хранения СУГ и испарение (кипение) жидкой фазы в регазификаторах предложенного типа осуществляется за счет геотермальной энергии, т.е. теплоты, аккумулированной массивом грунта, окружающим скважину и находящимся на достаточном удалении от земной поверхности. В этой области температурный режим массива грунта не подвержен влиянию сезонных изменений солнечной активности и других внешних факторов в данной местности.

Практически вся боковая поверхность скважины, смоченная жидкой фазой СУГ, находится в зоне грунта с постоянной по глубине положительной температурой. Притоками или стоками теплоты на торцах скважины можно пренебречь. Таким образом, теплообмен с грунтом происходит только в радиальном направлении в полярной системе координат.

Для упрощения можно полагать, что термическим сопротивлением стальной стенки корпуса ГТР (обсадной колонны) можно пренебречь, а

затрубное пространство, залитое цементом, рассматривать как составную часть грунта. Следовательно, теплообменная поверхность ГТР представляет собой смоченную жидкой фазой СУГ боковую стенку круглой цилиндрической скважины пробуренной в грунте. Ее радиус  $r_c$  принимаем равным внутреннему радиусу обсадной колонны  $r_{ок}$ .

В ГТР сжиженный газ образует двухфазную систему с плоской свободной поверхностью раздела между жидкостью и паром. Эта система может длительно существовать при давлении в паровой полости, соответствующем упругости насыщенных паров при определенной температуре жидкости. Зависимости упругости насыщенного пара индивидуальных углеводородов от температуры приведены в справочных пособиях [11, 13].

Механизм переноса теплоты от массива грунта к жидкой фазе СУГ без отбора пара в газовую сеть потребителей (в режиме хранения) сводится к естественной конвекции. В процессе прогрева СУГ температура жидкости со временем асимптотически приближается к температуре невозмущенного массива грунта на глубине нейтрального слоя гелиотермозоны.

При отборе пара в газовую сеть потребителей происходит резкое падение давления в полости паровой фазы СУГ, за счет чего возникает перегрев жидкости, приводящий к возникновению пузырькового кипения.

В обоих случаях температуры стенки скважины и жидкости меняются во времени, в связи с чем процесс теплообмена приобретает существенно нестационарный характер.

На процессы переноса теплоты в жидкой фазе СУГ внутри ГТР и окружающем грунте оказывают значительное влияние технологические режимы его функционирования как части централизованной системы локального газоснабжения СУГ, что, в свою очередь, определяется особенностями газопотребления абонентов.

По условиям сложившегося бытового уклада населения газоснабжение жилых зданий характеризуется цикличным изменением расхода газа в течение суток с максимумом газопотребления в утренние и вечерние часы. Газовая нагрузка на систему газоснабжения и ГТР, как ее часть, изменяется, кроме того по дням недели, достигая максимума в выходные и предпраздничные дни.

При цикличном режиме отбора паровой фазы СУГ процессы нестационарного теплообмена между жидкостью в ГТР и грунтом протекают также циклично.

В часы активного газопотребления происходит интенсивный перенос теплоты от массива грунта к жидкой фазе, которая быстро испаря-

ется. В связи со значительным расходом теплоты на осуществление фазового перехода жидкости в пар, ее температура резко снижается, что приводит к понижению температуры грунта вокруг скважины. Если интенсивность отбора газа в сеть велика, то могут быть достигнуты существенно отрицательные температуры в системе жидкость-грунт. Влажный грунт при этом в определенной зоне промерзает.

В часы существенного снижения или даже полного прекращения отбора паровой фазы в газовую сеть (например, в ночное время) происходит восстановление температуры охлажденных слоев грунта вокруг скважины и, как следствием, нагрев жидкости. В таком случае рационально предусматривать отключение «расходного» ГТР от сети и перевод его в резерв до максимально полного восстановления температурного поля вокруг него и прогрева жидкости до достижения практического теплового равновесия с грунтом.

При непрерывном отборе паровой фазы СУГ на нужды технологических потребителей тепловое состояние системы ГТР – массив грунта быстро проходит стадии нестационарного теплообмена и протекает в режиме установившегося квазистационарного переноса теплоты. Интенсивность его, а следовательно и паропроизводительность ГТР, меньше, чем на начальных стадиях процесса, но длительность их работы может составлять значительную величину. Восстановление температурного поля массива пород вокруг скважины в таком случае будет происходить после опорожнения ГТР, когда система газоснабжения потребителей будет переключена на другой, полностью запрограммированный регазификатор.

Единое решение задачи сопряженного нестационарного переноса теплоты в системе «ГТР – массив грунта» формально можно представить состоящим из решений двух отдельных задач: внутренней и внешней, обеспечивая лишь их сшивку по температуре на стенке скважины.

Внутренняя задача включает в себя процессы теплопереноса в жидкой фазе СУГ, находящейся в ГТР, при различных технологических режимах.

В настоящей статье рассматриваются только процессы теплопереноса в жидкости, находящейся в вертикальной цилиндрической скважине геотермального регазификатора с радиусом, значительно меньшим его глубины ( $r_c \ll H_{гтр}$ ) в режиме хранения СУГ (без отбора паровой фазы в сеть потребителей).

В этом случае теплоотвод от массива пород к жидкой фазе СУГ происходит за счет теплоотдачи при гравитационной свободной конвекции в объеме скважины ГТР с грунтовыми стенками (условно).

Свободной конвекцией называется движение жидкости под действием неоднородного поля массовых сил, приложенных к частицам жидкости внутри системы. В нашем случае эти силы обусловлены гравитационным внешним полем. Проще говоря, свободная конвекция – это движение жидкости, вызванное разницей плотностей в различных точках ее объема.

Перенос теплоты, происходящий при обтекании твердой теплообменной поверхности (стенки скважины) жидкостью при свободном движении, называют теплоотдачей при свободной (естественной) конвекции.

Основной задачей исследования любого вида теплоотдачи является определение связи между тепловой нагрузкой поверхности нагрева (плотностью теплового потока  $q_{\text{н}}$ ), и разностью между температурой этой поверхности  $T_{\text{г}}$  и температурой жидкости  $t_{\text{ж}}$  в данном сечении резервуара. Для этого необходимо знать распределение температуры в жидкости, полагая, что это распределение обладает свойствами непрерывного поля, для которого имеют смысл понятия о градиенте температуры и векторе плотности теплового потока на омываемой поверхности.

В общей постановке рассмотрение механизма теплоотдачи при свободной конвекции основано на следующих допущениях:

- все характеристики процесса переноса теплоты в жидкости есть непрерывные функции координат и времени, кроме того, этот процесс протекает изобарически, т.е. происходит при постоянном давлении;
- жидкость находится в абсолютном контакте с поверхностью теплообмена, т.е. имеет место смачивание жидкостью стенки скважины;
- термическое сопротивление контакта между жидкостью и поверхностью теплообмена пренебрежимо мало;
- теплота диссипации энергии возникающей за счет вязкого трения при движении жидкости вдоль стенки пренебрежимо мала по сравнению с изменением ее энтальпии за счет теплообмена;
- кинетическая энергия движения жидкости пренебрежимо мала по сравнению с изменением ее энтальпии;
- теплофизические характеристики жидкости не зависят от температуры.

Однако, даже при этих упрощающих допущениях задача аналитического определения температурного поля в свободно движущейся жидкости наталкивается на значительные математические трудности, так как требует предварительного решения гидравлической задачи, т.е. нахождения поля скоростей, что не всегда возможно, например, при турбулентном режиме течения.

Последнего можно избежать, если при рассмотрении теплоотдачи конвекцией ввести понятия пограничного слоя и коэффициента теплоотдачи, который характеризует интенсивность переноса теплоты от твердой поверхности к потоку жидкости, омывающей эту поверхность.

Пограничным слоем называют прилегающий к поверхности слой жидкости, толщина которого много меньше геометрических размеров твердой поверхности в направлении движения жидкости и геометрических характеристик потока жидкости в направлении, нормальном стенке. В пограничном слое сосредоточена практически большая часть изменения скорости жидкости в поперечном сечении резервуара. В зависимости от величины средней скорости жидкости в пограничном слое режим течения может быть ламинарным или турбулентным.

При любом режиме течения в пограничном слое можно выделить подслой, непосредственно прилегающий к твердой поверхности, который можно рассматривать неподвижным, вследствие вязкости.

К этому слою можно применить закон Фурье-Кирхгофа, описывающий перенос теплоты теплопроводностью:

$$q_F = -\lambda_{ж} \frac{\partial t}{\partial n}, \quad (1)$$

где  $\lambda_{ж}$  – теплопроводность жидкости,  $\frac{\partial t}{\partial n}$  – градиент температуры жидкости в направлении нормали к твердой поверхности.

Это уравнение можно представить в ином виде:

$$q_F = \frac{-\lambda_{ж} \frac{\partial t}{\partial n}}{T_c - t_{ж}} (T_c - t_{ж}), \quad (2)$$

где  $T_c$  – температура стенки;  $t_{ж}$  – температура жидкости.

Коэффициент пропорциональности  $\frac{-\lambda_{ж} \frac{\partial t}{\partial n}}{T_c - t_{ж}}$  в этом уравнении при принятых допущениях не зависит от температуры, поэтому его можно рассматривать в качестве меры интенсивности процесса теплоотдачи, т.е. в качестве коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции  $\alpha_{жн}$ .

Тогда уравнение (2) можно рассматривать как выражение закона Ньютона для теплоотдачи, устанавливающего прямую пропорциональность между плотностью теплового потока  $q_F$  и температурным напором  $T_c - t_{ж}$ :

$$q_f = \alpha_{кв} (T_c - t_{ж}). \quad (3)$$

Строго говоря, использование для описания нестационарного процесса теплоотдачи при свободной конвекции уравнения (3) является условным приемом, однако он существенно облегчает решение основной задачи, вследствие того, что при этом отпадает необходимость определять температурное поле в жидкости.

Большое количество теоретических и экспериментальных исследований теплообмена при свободной конвекции [2, 5, 6, 7, 9, 10] подтверждает продуктивность такого феноменологического подхода.

Жидкая фаза СУГ, заполняющая большую часть вертикальной скважины, при прогреве приходит в состояние свободного движения вследствие разности плотностей отдельных ее объемов, вызванной неоднородностью поля температуры жидкости по радиусу скважины.

Изменение плотности жидкости  $\rho$  при различной температуре можно описать зависимостью:

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(t - t_0)], \quad (4)$$

где  $\rho_0$  – исходная плотность при начальной температуре  $t_0$ ;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения жидкости;  $t$  – приобретенная при нагреве температура жидкости.

Из решения системы уравнений движения, сплошности и энергии для ламинарного режима течения в пограничном слое жидкости, в [7, 9, 12] получена критериальная зависимость, позволяющая определить интенсивность теплоотдачи при свободной конвекции:

$$\frac{\alpha_{кв} D}{\lambda_{ж}} = f \left( \frac{a_m}{v_{ж}}, \frac{g \beta \Delta t D^3}{v_{ж}^2} \right), \quad (5)$$

или в безразмерной форме:

$$Nu_{кв} = f(Pr, Gr), \quad (6)$$

где  $Nu_{кв} = \frac{\alpha_{кв} D}{\lambda_{ж}}$  – число Нуссельта, определяющее интенсивность тепло-

отдачи при свободной конвекции;  $Pr = \frac{v_{ж}}{a_m}$  – число Прандтля для жидкости, представляющее собой отношение кинематической вязкости к температуропроводности;

$Gr = \frac{g \beta \Delta t D^3}{v_{ж}^2}$  – число Грасгофа для жидкости, представляющее собой отношение архимедовых сил к силам вязкости.

Попытка получения конкретного вида функциональной зависимости (6) аналитическим методом была предпринята в [15].

Сопоставление экспериментальных данных интенсивности теплоотдачи при свободной конвекции для различных жидкостей, обтекающих твердые поверхности разной формы при различной ориентации последних относительно потока и гравитационного поля, с полученными в этой работе результатами решения критериальных зависимостей показало в большинстве случаев значительное их несовпадение.

Это объясняется тем, что в [15] принято упрощенное описание распределения скоростей и температур в пограничном слое при различных режимах течения, которое не соответствует реальной, более сложной физической картине. Кроме того, при аналитическом решении учет влияния зависимости физических характеристик жидкости от температуры на теплоотдачу представляет значительную математическую сложность. Задача о теплоотдаче при турбулентном пограничном слое вообще не может быть решена аналитически. Сказанное привело к тому, что большинство задач теплоотдачи при свободной конвекции были решены экспериментально, с представлением результатов в критериальной форме на основе теории подобия тепловых процессов.

Наибольшее распространение для определения средней интенсивности теплоотдачи при свободной конвекции получила эмпирическая формула, предложенная академиком М.А.Михеевым [12]:

$$Nu = C (Gr \cdot Pr)^n, \quad (7)$$

где значение постоянной  $C$  и показателя степени  $n$  различны для различных режимов переноса теплоты, определяемых величиной произведения  $Gr \cdot Pr$ .

Установлено, что существуют три режима переноса теплоты при свободной конвекции [12].

Первый режим имеет место при численных значениях  $Gr \cdot Pr \leq 500$  и характеризуется слабой зависимостью числа  $Nu$  от определяющих критериев:

$$Nu = 1,18 (Gr \cdot Pr)^{1/8}. \quad (8)$$

Здесь теплоперенос в жидкости осуществляется, в основном, теплопроводностью через малоподвижный пристенный подслои.

При втором режиме, характерном для значений  $500 < Gr \cdot Pr < 2 \cdot 10^7$ , теплоотдача осуществляется за счет свободной конвекции при ламинарном режиме течения в пограничном слое.

Интенсивность теплоотдачи здесь определяется критериальным уравнением:

$$Nu = 0,54 (Gr \cdot Pr)^{1/4}. \quad (9)$$

При третьем режиме (в области  $Gr \cdot Pr > 2 \cdot 10^7$ ) теплота переносится за счет свободной конвекции при турбулентном режиме течения в пограничном слое жидкости.

Теплоотдача здесь описывается критериальным уравнением:

$$Nu = 0,135 (Gr \cdot Pr)^{1/3}. \quad (10)$$

При высоте (глубине)  $H$  канала, значительно превышающей его поперечный размер (диаметр трубы, ширину плоской или цилиндрической щели и т.п.) на гидродинамическую картину течения при свободной (естественной) конвекции может оказывать влияние ограниченность пространства.

Между восходящим потоком жидкости в непосредственной близости от стенки и нисходящим потоком в центральной области канала обычно возникает взаимодействие, приводящее к помехам их независимому движению. Как результат, в канале может возникнуть внутренняя циркуляция с несколькими замкнутыми контурами по высоте канала.

Возникновение этих контуров оказывают существенное влияние на теплоотдачу при естественной конвекции.

Высота циркуляционных контуров  $h$  в трубе (скважине) зависит не только от отношения ее длины (глубины) к диаметру  $\frac{H}{D}$ , но и от произведения  $Gr \cdot Pr$ .

Гидравлическая картина течения при свободной конвекции в ограниченном пространстве настолько сложна, что значение коэффициентов теплоотдачи в этих условиях может быть получено только экспериментально для конкретного вида емкости, ее размеров и типа жидкости (газа) [10].

Академиком М. А. Михеевым в [12] для устранения указанных трудностей тепловой поток при естественной конвекции через жидкостные и газовые прослойки, в том числе цилиндрические, предложено рассчитывать по формуле для переноса теплоты теплопроводностью:

$$q_f = \frac{\lambda_{ж}}{\delta} (T_c - t_{ж}), \quad (11)$$

где  $\lambda_{жк} = \varepsilon_{кв} \cdot \lambda_{ж}$  – эквивалентная теплопроводность, учитывающая влияние конвективного теплопереноса;  $\lambda_{ж}$  – теплопроводность жидкости;  $\varepsilon_{кв}$  – коэффициент конвекции;  $T_c$  – температура поверхности, обтекаемой жидкостью;  $t_{жк}$  – температура жидкости.

Величина коэффициента конвекции  $\varepsilon_{кв}$  является функцией  $Gr \cdot Pr$ . Это соотношение установлено экспериментально и с достаточной точностью описывается зависимостью

$$\varepsilon_{кв} = \frac{0,18(\beta g Pr)^{0,25} \cdot (D^3 \Delta t)^{0,25}}{\nu^{0,5}}, \quad (12)$$

справедливой при  $Gr \cdot Pr > 10^3$  [12].

Приведем пример расчета коэффициента теплоотдачи от стенки скважины диаметром  $D = 0,5$  м, заполненной н-бутаном, охлажденным при транспортировании до температуры наружного воздуха, типичной для зимнего периода на территории Украины  $t_{ж0} = -16$  °С.

Температура поверхности стенки скважины в начале процесса прием равной естественной температуре массива пород на глубинах, ниже глубины нейтрального слоя гелиотермозоны. Для центральных регионов Украины она может быть принята  $T_c = T_\infty = 14$  °С.

Тогда температурный напор на стенке скважины составляет:

$$\Delta t = T_c - t_{жк} = 14 - (-16) = 30 \text{ °С.}$$

Свойства жидкой фазы н-бутана согласно данным, приведенным в [13], приняты равными:

- теплопроводность  $\lambda_{жк} = 0,132$  Вт/(м·°С);
- удельная теплоемкость  $C_{жк} = 2,24$  кДж/(м·°С);
- плотность  $\rho_{жк} = 600$  кг/м<sup>3</sup>;
- динамическая вязкость  $\mu_{жк} = 210,8 \cdot 10^{-6}$  Н·с/м<sup>2</sup>;
- коэффициент объемного расширения  $\beta_{жк} = 0,0021$  1/°С.

$$\text{Отсюда } a_{жк} = \frac{\lambda_{жк}}{C_{жк} \cdot \rho_{жк}} = \frac{0,132}{2240 \cdot 600} = 0,98 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$\nu_{жк} = \frac{\mu_{жк}}{\rho_{жк}} = \frac{210,8 \cdot 10^{-6}}{600} = 3,51 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$Pr_{ж} = \frac{\nu_{ж}}{a_{ж}} = \frac{3,51 \cdot 10^{-7}}{0,98 \cdot 10^{-7}} = 3,6;$$

$$Gr_{ж} = \frac{\beta g D^3 \Delta t}{\nu_{ж}^2} = \frac{0,0021 \cdot 9,81 \cdot 10,5^3}{(3,51 \cdot 10^{-7})^2} \cdot 30 = 6,3 \cdot 10^{11};$$

$$Gr \cdot Pr_{ж} = 2,27 \cdot 10^{12}.$$

Следовательно, в нашем случае теплоотдача за счет свободной конвекции протекает в условиях турбулентного режима движения пограничного слоя и рассчитывается по формуле (10):

$$Nu = 0,135 (Gr \cdot Pr)^{1/3} = 0,135 (2,27 \cdot 10^{12})^{1/3} = 0,135 \cdot 1320 = 1780.$$

Коэффициент теплоотдачи при этом равен:

$$\alpha_{кв} = \frac{Nu \cdot \lambda_{ж}}{D} = \frac{1780 \cdot 0,132}{0,5} = 470 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}.$$

Коэффициент конвекции равен:

$$\epsilon_{кв} = \frac{0,18 \cdot (0,0021 \cdot 9,81 \cdot 3,6)^{0,25} \cdot (0,5^3 \cdot 30)^{0,25}}{(3,51 \cdot 10^{-7})^{0,5}} = 221,26.$$

Эквивалентная теплопроводность жидкой фазы СУГ при естественной конвекции в этом случае составляет:

$$\lambda_{кв} = 221,26 \cdot 0,132 = 29,2 \approx 30 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}.$$

Она существенно больше, чем теплопроводность контактирующего с жидкостью грунта ( $\lambda_{г} \approx 1,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ).

Отсюда можно сделать вывод, что теплообмен в жидкости, заполняющей скважину ГТР, аналогичен теплообмену в твердом стержне из материала с высокой теплопроводностью, помещенном в среду с низкой интенсивностью теплообмена на его поверхности. Такой случай характеризуется малым значением критерия подобия Био  $Bi = \frac{\alpha \ell}{\lambda} \rightarrow 0$ .

Особенностью такого теплообмена является весьма слабое изменение температуры внутри стержня по сечению при регулярном и квазистационарном режимах. Лишь при иррегулярном режиме значительными являются расхождения температуры по радиусу.

Количественная оценка интенсивности переноса теплоты при естественной конвекции по изложенной выше методике впоследствии может использоваться при решении сопряженной задачи нестационарной теплопроводности для системы жидкая фаза СУГ – грунт в режиме хранения ее в геотермальных регазификаторах.

### Выводы

Рассмотрен механизм теплопереноса от грунта к жидкой фазе СУГ при ее нагреве в режиме хранения в ГТР. Показана возможность замены фактического механизма теплообмена за счет свободной конвекции эквивалентной теплопроводностью. Это позволяет описывать тепловое взаимодействие жидкой фазы СУГ в ГТР и грунте единой сопряженной краевой задачей нестационарной теплопроводности в двух разнородных средах.

С использованием наиболее надежных критериальных зависимостей оценена интенсивность теплоотдачи при естественной конвекции и соответствующее значение эквивалентного коэффициента теплопроводности.

В связи с тем, что последний существенно превышает теплопроводность грунта, можно провести аналогию теплообмена в жидкости, хранящейся в ГТР, с теплообменом в твердом стержне из материала с высокой теплопроводностью, помещенном в среду с низкой интенсивностью теплообмена на поверхности контакта, т.е. при  $Bi \rightarrow 0$ . Для таких условий характерно практически равномерное распределение температуры по радиусу при регулярном и квазистационарном режимах.

Количественная оценка эквивалентной теплопроводности для жидкой фазы СУГ различного состава может быть использована в последующем при численном решении задачи теплового взаимодействия ГТР и грунта в этих условиях.

### Литература

1. Авторское свидетельство СССР № 1374680, кл. F<sup>63</sup>/00, 1987.
2. *Боришанский В. М., Козырева А. П., Светлова Л. С.* Конвективная теплопередача в двухфазном и однофазном потоках. – М.: Энергия, 1964.
3. *Дядькин Ю. Д., Гендлер С. Г.* Процессы тепломассопереноса при извлечении геотермальной энергии. – Л.: Изд-во ЛПИ. 1985.
4. *Енин П. М.* Централизованная система локального газоснабжения потребителей СУГ от геотермальных установок // Вентиляція, освітлення та теплогазозастачання. Вип. 1. – К.: КНУБА, 2001.

5. *Клименко А. П., Козицкий В. М.* Расчет коэффициентов теплоотдачи при кипении углеводородов и их галоидопроизводных // *Химическая промышленность Украины*. - 1967. - № 1.

6. *Клименко А. П., Козицкий В. М.* Экспериментальное исследование теплообмена при кипении н-бутана // *Газовая промышленность*. - 1967. - № 6.

7. *Кутателадзе С. С.* Основы теории теплообмена. - М.: Наука, 1970.

8. *Лабунцов Д. А.* Обобщение зависимости для теплопередачи при пузырьковом кипении жидкостей // *Теплоэнергетика*. - 1960. - № 5.

9. *Лыков А. В.* Теплообмен. Справочник. - М.: Энергия, 1971.

10. *Лыков А. В., Берковский Б. М., Фертман В. Е.* Экспериментальные исследования теплоотдачи при свободной конвекции в замкнутых осесимметричных объемах // *ИФЖ*, 1969, Т. XVI. - № 6.

11. *Преображенский Н. И.* Сжиженные углеводородные газы. - Л.: Недра, 1975.

12. *Михеев М. А.* Основы теплопередачи. - М.: Госэнергоиздат, 1956.

13. *Стаскевич Н. Л., Вигдорчик Д. Я.* Справочник по сжиженным углеводородным газам. - Л.: Недра, 1986.

14. *Толубинский В. Н.* Теплоотдача при кипении // *Известия ВУЗов, Энергетика*, 1963. - № 10.

15. *Эккерт Э., Дрейк Р.* Теория теплообмена - М.: Госэнергоиздат, 1961.