

ТЕПЛООТДАЧА ПРИ ПУЗЫРЬКОВОМ КИПЕНИИ ЖИДКОЙ ФАЗЫ СУГ В ГЕОТЕРМАЛЬНОМ РЕГАЗИФИКАТОРЕ ПРИ РЕЖИМЕ ОТБОРА ГАЗА

В геотермальном регазификаторе, заправленном сжиженным углеводородным газом, жидкая фаза отделена от паровой свободной плоской границей раздела. В случае постоянства их объема, между фазами устанавливается динамическое равновесие, при котором в любой момент времени скорость испарения жидкости равна скорости конденсации пара, как бы ни менялась температура системы за счет обмена теплотой с массивом грунта, окружающим скважину.

Результатом прогрева жидкой фазы СУГ при этих условиях будет только повышение давления паровой фазы в ГТР. Оно будет в каждый момент равняться упругости паров при соответствующей установившейся температуре жидкости.

При подключении полости с паровой фазой к системе газоснабжения потребителей и отборе газа в ней происходит падение давления. При этом равновесие между паром и жидкостью в ГТР нарушается и начинается испарение жидкой фазы.

Интенсивность парообразования при этом зависит от степени снижения давления в полости паровой фазы, т.е. от расхода газа в системе газоснабжения.

При малом расходе газа на нужды потребителей для восстановления равновесия между фазами достаточно испарения жидкости со свободной поверхности раздела фаз. Процесс испарения в этом случае может протекать без подвода теплоты извне. Теплота для осуществления фазового перехода при этом отбирается от слоев жидкости, находящихся непосредственно под свободной поверхностью. По мере снижения температуры охлажденные слои жидкости будут опускаться вниз, а их место будут занимать глубинные слои с температурой выше температуры насыщения.

Таким образом, при незначительных расходах газовой фазы в системе газоснабжения испарение жидкости в ГТР сопровождается возникновением естественной конвекции.

При быстром снижении давления в паровой полости до значений существенно ниже давления насыщения за счет большого расхода газа

потребителями в ГТР может происходить объемное кипение, т.е. испарение жидкости с возникновением дополнительных поверхностей раздела между фазами в объеме жидкости. Ее температура может при этом существенно понизиться.

При достижении значительного перепада температур между стенкой скважины и жидкой фазой СУГ к указанным механизмам испарения может добавиться процесс поверхностного пузырькового кипения на стенке скважины.

При этом паровые пузыри образуются только при наличии подвода теплоты к кипящей жидкости через поверхность нагрева и при наличии вблизи нее слоя перегретой жидкости с температурой, превышающей температуру насыщения при установившемся давлении.

В ГТР могут иметь место все три рассмотренных вида парообразования при отборе газа в сеть потребителей.

Пленочный режим кипения СУГ, когда скорость парообразования превышает скорость отвода пара от поверхности, в ГТР наблюдаться не может вследствие небольших плотностей теплового потока к жидкости от массива пород, окружающих скважину, поэтому далее будет рассматриваться лишь пузырьковый режим кипения.

Паровые пузыри могут возникать и развиваться в жидкости только из зародышей паровой фазы – центров парообразования. Механизм образования и природа самих зародышей изучены еще недостаточно полно. Однако в большинстве классических работ, посвященных кипению, [7, 9, 12, 14] признано, что в качестве зародышей могут служить:

- при объемном кипении – пузырьки пара, возникшие в объеме перегретой жидкости вследствие случайных флуктуаций быстрых молекул (зоны разрежения);
- при поверхностном кипении – пузырьки стороннего газа, адсорбированные поверхностью нагрева или выделившиеся из нее, а также элементы дефектов этой поверхности (микротрещины, микровпадины и т.д.).

Зародыши паровой фазы могут быть жизнеспособными и нежизнеспособными.

Жизнеспособные зародыши, возникнув на поверхности, при подводе теплоты развиваются в сферические пузыри, размеры которых быстро увеличиваются. При достижении определенного диаметра d_0 , пузыри отрываются от поверхности и всплывают под действием подъемных сил, продолжая значительно увеличиваться в объеме за счет испарения перегретой жидкости внутрь пузыря. Взрывоподобный процесс роста пузырька на поверхности нагрева сопровождается резким турбулизи-

рующим воздействием на вязкий подслоя жидкости, прилегающий к стенке, что приводит к интенсификации теплоотдачи. Количество пара, выделяющегося во время развития пузыря на поверхности до отрыва, не велико (около 5% от общего объема). Основное же количество пара выделяется при пузырьковом кипении во время испарения перегретой жидкости в объем пузырей при их подъеме. Как правило, размер пузыря при этом увеличивается по сравнению с отрывным диаметром d_0 на порядок.

Вопросу изучения интенсивности теплоотдачи при поверхностном пузырьковом кипении посвящено большое количество работ [2, 7, 9, 14]. В них указывается, что на интенсивность теплоотдачи при поверхностном пузырьковом кипении оказывает влияние значительное количество факторов:

- материал и состояние поверхностного нагрева;
- ее размер и ориентация в гравитационном поле;
- высота слоя жидкости над поверхностью нагрева;
- адсорбция газов на поверхности нагрева;
- смачиваемость поверхности нагрева и величина краевого угла;
- поверхностное натяжение жидкости;
- теплофизические свойства жидкости и материала стенки;
- давление и температура насыщения;
- характер движения жидкости относительно поверхности нагрева;
- температурный напор или плотность теплового потока на поверхности нагрева и др.

Приведенный далеко не полный перечень факторов, оказывающих влияние на теплоотдачу при пузырьковом кипении, указывает на чрезвычайную сложность этого процесса. Это объясняет то, что теплоотдача при кипении изучается, в основном, экспериментальными методами с последующим представлением полученных результатов в критериальной форме [6, 7, 8, 9, 12, 14].

Обработка опытных данных состоит в установлении функциональной связи между коэффициентом теплоотдачи при кипении α_K и определяющими параметрами процесса. Если опыты проводят с одним родом жидкости, при подводе теплоты к одной и той же поверхности при фиксированном давлении насыщения, то основными определяющими параметрами процесса являются температурный напор Δt или плотность теплового потока q_F .

Установлено, что при различных величинах Δt , если задан температурный напор между стенкой и жидкостью, или при различных вели-

чинах q_F , если задан тепловой поток на стенке, характер зависимости интенсивности теплоотдачи от этих параметров различен. В зависимости от величины Δt и q_F процесс кипения протекает в нескольких различных режимах, каждому из которых свойственен собственный механизм переноса теплоты от поверхности нагрева к жидкости.

При малых значениях Δt или q_F процесс переноса теплоты протекает в режиме неразвитого кипения. Неразвитое кипение характеризуется незначительной плотностью распределения активных центров парообразования по теплообменной поверхности вследствие малого перегрева пристенного слоя жидкости.

Возникновение, рост и движение после отрыва относительно малого числа пузырьков пара в жидкости при этом не оказывает существенного влияния на интенсификацию теплоотдачи за счет турбулизации вязкого пристенного слоя.

Теплоотдача при неразвитом режиме кипения определяется, в основном, процессами переноса теплоты за счет естественной конвекции и характеризуется сравнительно низкой интенсивностью. Ей свойственна слабая зависимость α_K от Δt или q_F .

При значительно больших температурных напорах или при более высоких плотностях теплового потока на стенке наступает режим развитого пузырькового кипения. Он характеризуется весьма сильной зависимостью α_K от Δt или q_F , так как при значительных перегревах пристенного слоя жидкости число активных центров парообразования резко возрастает. Турбулизация, а значит интенсифицирующая теплоотдачу роль пузырьков, проникающих в вязкий пристенный слой жидкости, при этом режиме также резко увеличивается.

В большинстве технических устройств кипение происходит в режиме развитого кипения. Поэтому подавляющая часть исследований теплоотдачи при кипении посвящено именно этому, наиболее часто встречающемуся на практике режиму пузырькового кипения [7, 8, 9, 12, 14].

Подтверждением чрезвычайной сложности процессов кипения является неоднозначность результатов, полученных различными авторами в экспериментах по кипению одной и той же жидкости при, казалось бы, одинаковых условиях. Особенно это касается органических жидкостей, в частности сжиженных углеводородных газов [5, 6].

Это положение иллюстрируется приведенными в табл. 1 различными уравнениями, которыми аппроксимируются опытные значения коэффициентов теплоотдачи α_K как функции плотности теплового пото-

ка q_F . Они получены различными авторами при развитом кипении пропана и н-бутана для одной и той же температуры насыщения $t_s = 20^\circ\text{C}$, т.е. при одинаковом давлении.

Таблица 1

Зависимости $\alpha_K = f(q_F)$ при кипении пропана и н-бутана по данным различных авторов

Авторы	Литература	Зависимости $\alpha_K = f(q_F)$	
		для пропана	для н-бутана
Боришанский В.М. и др.	[2]	$3,78q^{2/3}$	$1,67q^{2/3}$
Клименко А.П., Козицкий В.И.	[6]	—	$2,5q^{0,7}$
Кутателадзе С.С.	[7]	$1,86q^{0,7}$	$1,57q^{0,7}$
Преображенский Н.И.	[11]	$2,0q^{0,7}$	$1,02q^{0,7}$

Как видно из таблицы, зависимость $\alpha_K = f(q_F)$ при развитом кипении легких углеводородов описывается уравнениями вида

$$\alpha_K = Aq^{0,7}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}, \quad (1)$$

где A — постоянная, численное значение которой даже для одной и той же температуры насыщения существенно различается у различных авторов. Это свидетельствует о необходимости учета индивидуальных свойств жидкости.

Большинство авторов, производивших исследования интенсивности теплоотдачи при кипении легких углеводородов и фреонов, отмечают незначительную зависимость α_K от температуры их насыщения t_s .

В [6] предложено учитывать это влияние изменением постоянной A в пределах от 2,4 для $t_s = 10^\circ\text{C}$ до 3,3 для $t_s = 50^\circ\text{C}$. Для промежуточных значений температуры насыщения t_s величина A определяется графически или интерполяцией.

В [11] предложена следующая зависимость для учета влияния температуры насыщения легких углеводородов на коэффициент теплоотдачи при развитом кипении:

$$\alpha_K = \frac{A}{3,3 - 0,0115(t_s - 100)} q^{0,7}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}, \quad (2)$$

где $A = 4,3$ для н-бутана; $A = 8,5$ для пропана.

Для обобщения экспериментальных данных, полученных при развитом пузырьковом кипении углеводородов в широком диапазоне температур и давлений насыщения в [5] был предложен иной метод учета индивидуальных свойств жидкостей. Он основан на выводах теории термодинамического подобия, а именно, на правиле соответственных состояний для родственной в физико-химическом отношении группы жидкостей. Физические параметры таких веществ, входящие в уравнение, описывающее теплоотдачу при кипении, взаимосвязаны на линии насыщения, включая критическую точку.

Это дает возможность вычислить коэффициент теплоотдачи при кипении органических жидкостей для заданной тепловой нагрузки и рабочего давления на основании данных о ее критических параметрах ($P_{кр}$, $T_{кр}$) и молекулярной массе M .

Зависимость коэффициента теплоотдачи при развитом кипении от давления насыщения жидкости P_s в [5] предложено учитывать функцией:

$$F\left(\frac{P_s}{P_{кр}}\right) = 0,62 + 3\frac{P_s}{P_{кр}}, \quad (3)$$

Это свидетельствует о сравнительно слабом влиянии давления насыщения на интенсивность теплоотдачи при развитом кипении, т.к. $P_{кр} \gg P_s$. Такой вывод совпадает с анализом зависимостей для α_K , полученных другими исследователями [2, 8, 10].

Количественная зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока при развитом кипении легких углеводородов и их галоидопроизводных (фреонов) в большом объеме при различных давлениях насыщения, предложенная в [5], описывается уравнением:

$$\alpha_K = 320 \frac{P_{кр}^{0,3} \cdot \left(0,62 + 3\frac{P_s}{P_{кр}}\right)}{T_{кр}^{0,85} \cdot M^{0,15}} q_t^{0,7}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}, \quad (4)$$

Это уравнение наилучшим образом (с точностью $\pm 10\%$) согласуется с опытными данными, полученными в [11] для кипения пропана и н-бутана.

Зависимость коэффициента теплоотдачи при развитом пузырьковом кипении от приведенного значения давления насыщения, т.е. отношения $P_s/P_{кр}$, в [11] предложено учитывать уравнением, имеющим вид:

$$\alpha_K = \left(\frac{gR}{M} \right)^{1/6} A^{2/3} P_{кр}^{1/3} \cdot T_{кр}^{-5/5} \left(\frac{P_s}{P_K} \right)^{1/8} \left[1 + 3 \frac{P_s}{P_{кр}} + 5 \left(\frac{P_s}{P_{кр}} \right)^3 \right] \cdot q^{2/3}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}, (5)$$

где A – постоянная из уравнения (2); g – ускорение силы тяжести, м/с²; R – удельная газовая постоянная, Дж/(кг · °C).

Режим развитого кипения сжиженных углеводородов возникает при значениях плотностей теплового потока q_F , превышающих $5 \cdot 10^3$ Вт/м² [6]. При уменьшении q_F от $5 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^3$ имеет место переходный режим кипения, характеризующийся плавным снижением интенсивности теплоотдачи.

Начиная с тепловой нагрузки на поверхности теплообмена $q_F = 2 \cdot 10^3$ и при меньших значениях происходит неразвитое кипение, характеризующееся сильным влиянием на теплоотдачу естественной конвекции. Число активных центров парообразования на поверхности нагрева при этом резко снижается.

Опытные точки, полученные в режиме развитого кипения н-бутана в [6] описываются зависимостью.

$$\alpha_{p,K} = B q^{0.24}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}, (6)$$

где постоянная B слабо зависит от температуры насыщения t_s и меняется от $B = 81$ для $t_s = 10$ °C до 88 для $t_s = 50$ °C.

При малых значениях q_F , характерных для теплопритока от массива пород к теплообменной поверхности ГТР, коэффициент теплоотдачи при кипении н-бутана в [5] предложено определять по формуле:

$$\alpha_{np,K} = 0,385 (\beta_{ж} \cdot g \cdot \text{Pr}_{ж})^{0.25} \frac{\lambda_{\mu}^{0.75}}{\nu_{ж}^{0.5}} q^{0.25} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}. (7)$$

Обращает на себя внимание сходство уравнения (7) для неразвитого кипения с зависимостью для теплоотдачи путем естественной конвекции.

Для плотностей теплового потока, $q_F = 2 \cdot 10^3$ Вт/м² и менее, характерных для теплопереноса от массива пород к жидкой фазе СУГ в ГТР, уравнение (7) дает для н-бутана значение $\alpha_{np,K} = 500$ Вт/(м² · °C), что практически совпадает с интенсивностью теплоотдачи при естественной конвекции в таких же условиях.

Полученные значения коэффициентов теплоотдачи при неразвитом кипении углеводородов могут быть использованы в дальнейшем для решения задачи о расчетной паропроизводительности геотермальных регазификаторов.

Влияние высоты столба жидкости на кипение углеводородов в ГТР

Равновесный фазовый переход от жидкого состояния к газообразному при данном давлении происходит при определенной температуре, причем задание одного из этих параметров определяет значение другого. Указанная зависимость на фазовой диаграмме (в плоскости pT) отображается кривой равновесия фаз, которая проходит всегда под острым углом к оси $0T$, что свидетельствует об увеличении давления насыщенного пара с ростом температуры. Естественно, с увеличением давления растет и температура насыщения.

Чтобы паровой пузырек рос, отрывался и всплывал к поверхности раздела фаз, лопаюсь в конечном итоге, т.е. участвовал в процессе производства пара для нужд газоснабжения, необходимо выполнение определенных условий. Давление насыщенных паров внутри пузырька p_0'' должно стать равны общему давлению на пузырек в жидкости.

Последнее складывается из:

- внешнего давления p_0 на свободной границе раздела фаз;
- капиллярного давления p_σ , обусловленного действием сил поверхностного натяжения σ на границе сферического парового пузырька с радиусом r ;
- гидростатического давления p_f на глубине H , зарождения пузырька.

Общее давление на пузырек, которому должно противостоять давление насыщенных паров внутри него, чтобы обеспечивать его жизнеспособность, равно:

$$p_{\text{общ}} = p_0'' = p_0 + \frac{2\sigma}{r} + g\rho_{\text{ж}}H, \quad (8)$$

Гидростатическое давление столба жидкости в ГТР скважинного типа играет существенную роль при кипении сжиженных газов. В отличие от традиционных теплообменных аппаратов, им в нашем случае пренебрегать нельзя, ввиду большого отношения глубины скважин к диаметру.

Из конструктивных и эксплуатационных соображений высота столба жидкой фазы, заполняющей ГТР, составляет 9/10 ее полной глубины $H_{ГТР}$, принимаемой, как правило, $H_{ГТР} = 50$ м.

Таким образом, высота столба жидкости в геотермальном регазификаторе составляет $H_{ж} = 45$ м, что на дне скважины соответствует давлению 0,45 МПа.

Примем, что отбор паровой фазы на нужды газоснабжения из ГТР начинается при температуре жидкости, которая за счет прогрева достигла температуры массива пород на глубине залегания нейтрального слоя $T_{НС}$.

Как установлено ранее, для центрального региона Украины можно принять $T_{НС} = 14$ °С.

Согласно [13] при указанной температуре упругость насыщенных паров н-бутана $p_0 = p_s = 0,174$ МПа. Следовательно, в суммарном давлении, при котором возможно пузырьковое кипение, на долю гидростатического давления P_r приходится

$$P_r = p_s - p_0 = 0,174 - 0,120 = 0,054 \text{ МПа.}$$

Этому давлению соответствует высота столба жидкости H_3 , где еще возможно зарождение и развитие пузырьков пара при кипении насыщенной жидкости:

$$H_3 = \frac{p_s - p_0}{g \cdot \rho_{ж}} = \frac{0,054}{9,81 \cdot 600} = 9,2 \text{ м.}$$

Эта высота отсчитывается от свободной поверхности раздела фаз. В нижележащих слоях жидкой фазы пузырьковое кипение невозможно, т.к. здесь жидкость оказывается недогретой до температуры насыщения, соответствующей суммарному давлению на этих глубинах.

По мере снижения уровня жидкости в скважине за счет испарения при отборе пара, нижележащие слои СУГ также будут вовлекаться в процесс интенсивного парообразования, но не раньше, чем гидростатическое давление в сумме с давлением в полости паровой фазы сравняется с давлением насыщения, соответствующим установившейся температуре жидкости на данной глубине.

Округленное значение $H_3 \approx 10$ м примем в качестве предельной глубины, где возможно пузырьковое кипение на стенке геотермального регазификатора. Эту глубину целесообразно использовать в дальнейшем при определении площади поверхности, где происходит кипение, для нахождения паропроизводительности ГТР.

Рассмотрен механизм теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкой фазы СУГ в геотермальном регазификаторе при режиме отбора паровой фазы (газа) в газовую сеть на нужды потребителей.

Проанализированы имеющиеся в литературе эмпирические зависимости для описания зависимости коэффициента теплоотдачи при кипении от различных факторов как при развитом, так и неразвитом режимах.

Показано, что в силу небольших значений теплового потока на стенке скважины из массива грунта кипение жидкой фазы СУГ в ГТР происходит в неразвитом режиме, который характеризуется сильным влиянием естественной (свободной) конвекции. Это позволяет с достаточным основанием заменить указанные сложные механизмы теплопереноса более простым механизмом эквивалентной теплопроводности.

Оценена предельная глубина столба жидкости, на которой гидростатическое давление препятствует нормальному росту паровых пузырей на стенке, что приводит к прекращению кипения.

Полученные результаты количественной оценки коэффициента теплоотдачи при кипении СУГ в геотермальном регазификаторе позволяют рассчитывать его паропроизводительность, что является целью теплового расчета при проектировании ГТР.

Литература

1. Авторское свидетельство СССР №1374680, кл. F^{C3}/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 ЛГИ, 1985.
4. *Енин П. М.* Централизованная система локального газоснабжения потребителей СУГ от геотермальных установок // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання – К.: КНУБА, 2001. – № 6.
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.* Тепломассообмен. 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. И. Теплоотдача при кипении // Известия ВУЗов, Энергетика, 1963. — № 10.

15. Эккерт Э., Дрейк Р. Теория тепломассообмена — М.: Госэнергоиздат, 1961.