

УДК 536.24

**О МЕХАНИЗМЕ ТЕПЛООБМЕНА В УСЛОВИЯХ
СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ****ИСАЕВ Г.И., ТАГИЕВА З.Г., РАМАЗАНОВА С.Д., ЭЙЮБОВА К.С.***Азербайджанская Государственная Нефтяная Академия*

На основании многолетних исследований и наблюдений высказаны предположения относительно механизма теплообмена при движении жидкости в трубе в условиях сверхкритических давлений.

Повышенный интерес к проблеме конвективного теплообмена в условиях сверхкритических давлений теплоносителей тесно связан с проектированием и созданием высокоэффективных теплообменных аппаратов и устройств, применяемых в различной отрасли современной промышленности, включая энергетическую, авиационную, химическую, нефтехимическую и другие. Переход вещества на сверхкритические давления является основной линией развития теплотехники и это открывает широкий путь к научным исследованиям в области конвективного теплообмена. В этой связи, начиная с 70-х годов прошлого века в Азербайджанской Государственной Нефтяной Академии интенсивно ведутся научно-исследовательские работы, направленные на изучение температурного режима теплоотдающей поверхности стенки труб и теплоотдачи различных органических теплоносителей как при вынужденном, так и при свободном движении жидкости, охватывающих довольно широкий интервал изменения режимных параметров процесса.

На основании анализа результатов выполненных исследований установлено, что в условиях сверхкритических давлений теплоносителей наблюдаются различные режимы теплообмена, в том числе, нормальный, улучшенный, относительно ухудшенный и устойчивый режимы улучшенного теплообмена. Доказано, что в области $t_c \geq t_m$ коэффициент теплоотдачи возрастает примерно в 3 раза и более по сравнению с обычными условиями ($t_c < t_m$). Это подтверждено результатами многочисленных опытных данных, полученных с различными органическими теплоносителями при различных режимах вынужденного и свободного движений. В качестве примера результаты некоторых исследований представлены на рис.1 в виде зависимости $t_c = f(q)$. (Темные точки на этом рисунке получены в результате измерений в обратной последовательности, т.е. с уменьшением плотности теплового потока). Как отмечалось ранее, в [1] перечисленные выше режимы возникали при различных скоростях, давлениях и температурах жидкости. Качественного различия теплообмена при вертикальном (подъемное и опускное движения), горизонтальном и наклонном положениях обогреваемой трубы не обнаружено. Все эти результаты еще раз подтверждают, что режимы улучшенного теплообмена не являются какими-то случайными явлениями, а представляют собой особые режимы теплообмена, характерные для сверхкритических давлений. Значительный практический интерес представляет тот вид теплообмена, который обычно сопровождается высокочастотными колебаниями давления с большими амплитудами, представляющими опасность для работы обогреваемых каналов. Результаты наших исследований показали, что амплитуды колебания давления жидкости в области $t_c \approx t_m$ (участок БВ; рис.1) находятся в пределах $\pm (0,1 \dots 0,3)$ МПа, а при $t_c > t_m$ увеличиваясь, достигают $\pm 0,8$ МПа. В этих случаях амплитуда колебания температуры

теплоотдающей поверхности стенки трубы соответственно составляет $\pm (2...4)$ и $\pm (4...10)^\circ\text{C}$. Следует подчеркнуть, что уменьшение угла наклона трубы приводит к заметному уменьшению амплитуды измеряемых величин и при горизонтальном положении трубы они обладают минимальными значениями. При горизонтальном положении трубы измерения необходимых величин не создали особых трудностей по сравнению с измерениями при остальных положениях трубы. Кроме того, в этом случае сила звука, имеющая место в опытах, тоже была меньше. В связи с вышеизложенным, можно заключить, что указанное явление является одним из основных факторов, подлежащих учёту при проектировании и конструировании современных высоконапряженных теплообменных аппаратов и устройств. Таким образом, при турбулентном течении в условиях $t_c \geq t_m$ независимо от направления движения жидкости и положения трубы происходят колебания давления жидкости, и температуры охлаждаемой поверхности стенки трубы. С помощью показывающих приборов (образцовые манометры, потенциометры) возможно фиксировать лишь одно значение измеряемых величин. Как известно, при обобщении данных, полученных в условиях сверхкритических давлений, обычно пытаются дополнить известные соотношения поправками, учитывающими изменения физических параметров, например, как в виде $\rho_c/\rho_{ж}$, $C_{p,c}/C_{p,ж}$; и т.д. Параметры с индексом «с» определяются из соответствующих графиков, учитывающих изменения того или иного физического свойства в зависимости от температуры (изобары) по фиксированным значениям температуры охлаждаемой поверхности стенки трубы, после учета перепада температуры на стенке. При этом точный выбор теплофизических параметров, соответствующих этим температурам, из-за колебания давления жидкости затруднительно, так как выбор значений теплофизических параметров, необходимых для расчета, можно отнести к любой изобаре, расположенной между $P_{изм}$ и P . Поэтому, на наш взгляд, в будущем при обобщении опытных данных некоторый процент отклонения расчетных и экспериментальных результатов можно отнести за счет указанного явления.

В работе [2] дается сопоставление экспериментальных кривых распределения температуры стенки и коэффициента теплоотдачи с распределением флуктуаций давления при различных видах колебаний, причем, распределение t_c и изменение коэффициента теплоотдачи по длине трубы объясняется наличием колебаний давления жидкости.

Авторами работы [3] при исследовании теплообмена с углеводородной жидкостью, являющейся продуктом переработки нефти, в условиях сверх- и докритических давлений и вынужденном течении обнаружено, что при определенном значении плотности теплового потока наступает резкий скачок параметров: температура стенки падает, частота увеличивается, амплитуда уменьшается, а при последующем увеличении плотности теплового потока температура стенки начинает возрастать, частота остается неизменной и амплитуда увеличивается. В этой связи авторы [3] полагают, что при отсутствии перескока частоты температура стенки продолжала бы расти вплоть до потери трубкой прочности, что по данным [3] имело место при скоростях течения меньше 10 м/с. Следовательно, из этой работы вытекает, что скачкообразное увеличение частоты колебаний препятствует повышению температуры стенки за счет усиления турбулизаций пограничного слоя.

Наряду с изложенным, следует отметить, что при ламинарном режиме вынужденного движения углеводородов характер изменения графика зависимости $t_c=f(q)$ тоже достаточно сложный (рис.2). При ламинарном режиме в определенных условиях наблюдаются отдельные режимы теплоотдачи, подобно турбулентному режиму течения. Однако, как показывают результаты экспериментальных исследований, при меньших значениях массовой скорости движущегося потока переход от нормального режима к улучшенному режиму теплоотдачи осуществляется

без дополнительных эффектов. Установлено, что дополнительные эффекты появляются только при значении массовой скорости движущегося потока превышающей $600 \text{ кг/м}^2\text{с}$. При меньших значениях массовой скорости движущегося потока ($\rho w < 600 \text{ кг/м}^2\text{с}$) появление дополнительных эффектов соответствует точке Г по графику зависимости $t_c = f(q)$ и охватывает довольно широкий интервал изменения q (рис.2). Когда t_c с увеличением q , снижаясь, достигает значения, соответствующего точке Д указанной зависимости, устойчивый режим улучшенного теплообмена сопровождается периодическим звуком, колебаниями давления жидкости и температуры стенки, амплитуды которых составляют соответственно $(0,1 \dots 0,5) \text{ МПа}$ и $(5 \dots 15)^\circ\text{C}$.

Отметим, что когда переход к устойчивому режиму улучшенного теплообмена сопровождался возникновением термоакустических автоколебаний давления, ни в одном опыте мы не наблюдали нарушения целостности трубок. Однако наличие их все же, на наш взгляд, требует и в дальнейшем внимательного рассмотрения: допустимы ли они при работе создаваемого теплообменного аппарата и не окажут ли они отрицательного воздействия на его прочность и устойчивость.

Таким образом, всё выше изложенное дает возможность высказать наше мнение о физической сущности процесса, то есть о причинах возникновения отдельных режимов теплоотдачи, имеющих место при сверхкритических давлениях теплоносителей.

В первую очередь отметим, что при отсутствии дополнительных эффектов наступление улучшенного теплообмена при достижении температуры внутренней поверхности стенки трубы псевдокритической температуры исследуемой жидкости, несомненно, свидетельствует о влиянии изменения теплофизических параметров на процесс конвективной теплоотдачи. В рассматриваемых условиях все теплофизические свойства, резко изменяясь, получают свои экстремальные значения. Причем с удалением от критического давления, как показывают результаты исследований теплофизических свойств, в области псевдокритической температуры темп изменения физических параметров заметно ослабевает, что должно оказать определенное влияние на процесс конвективного теплообмена. В качестве примера для наглядности на рис. 3 иллюстрируется изменение изобарной теплоемкости при различных сверхкритических давлениях для одного исследованного нами вещества [4].

В связи с изложенным, по нашему мнению, независимо от условий протекания процесса теплоотдачи, если температура стенки или температура жидкости в пристеночном слое будет достигать псевдокритической температуры исследуемых веществ, своеобразное изменение теплофизических свойств, как отмечалось выше, должно оказать влияние на изучаемый процесс.

Известно, что при движении жидкости в обогреваемом канале максимальное и минимальное значения температуры жидкости в рассматриваемом сечении имеют место соответственно на внутренней поверхности и по оси трубы. Поэтому мы полагаем, что по мере повышения плотности теплового потока температура охлаждаемой поверхности стенки трубы возрастает и в точке Б зависимости $t_c = f(q)$ значение ее в околостеночном слое достигает псевдокритической температуры исследуемой жидкости. При этом в пристеночном слое образуется тонкий газовый прослой, а на оси движется относительно холодная жидкость, т.е. значение среднемассовой температуры, соответствующей точке Б указанной зависимости, во всех наших исследованиях не превышала $t_{кр}$. В указанном слое при $t_c \approx t_m$ отдельные частицы жидкости обладают минимальным значением плотности и максимальным значением изобарной теплоемкости. В результате резкого увеличения удельного объема отдельных частиц вещества возможно отталкивание некоторых из них от газового прослоя и попадание в зону относительно холодной жидкости, где происходит мгновенное уменьшение удельного объема и теплоемкости этих частиц. В результате сказанного, естественно, будет происходить разрушение пристеночного слоя и образовываться нестабильный пограничный слой, толщина которого будет зависеть от

характера изменения теплофизических свойств исследуемой жидкости, а также известного уже нам фактора от значения скорости движущегося потока. Чем больше значение массовой скорости движущегося потока, во-первых, толщина этого слоя будет меньше и, во-вторых, попадание отдельных частиц от газового прослоя в холодную зону и обратно будет происходить более интенсивно. По этой же причине, по нашему мнению, при больших значениях массовой скорости движущегося потока явно появляются дополнительные эффекты, и теплоотдача сопровождается колебаниями давления жидкости и температуры охлаждаемой поверхности стенки трубы, которые, в свою очередь, еще более осложняют рассматриваемый процесс. В случае, когда температура теплоотдающей поверхности стенки трубы превышает псевдокритическую, изобарная теплоемкость уменьшается (рис.3) и соответственно интенсивность теплообмена снижается. Все отмеченное выше относится к объяснению участка АБВГ графика зависимости $t_c=f(q)$.

При больших значениях плотности теплового потока и высокой температуре поверхности стенки трубы в результате термического разложения интенсификация процесса конвективного теплообмена, на основании наших исследований и наблюдений, более подробно объясняется с явным изменением цвета исследуемого объекта. В частности, в опытах с реактивным топливом марки ТС-1 естественный желтый цвет его при больших значениях плотности теплового потока, изменяясь, становился прозрачным. После одного такого опыта, с целью изучения дальнейшего поведения указанной жидкости с течением времени, мы набрали в чистую и закрытую посуду определенное количество отработанного вещества и следили за его состоянием. В течение более полусуток цвет исследуемого продукта постепенно изменялся и в конечном итоге возвращался к первоначальному. Этот результат свидетельствует о том, что при больших значениях q и высоких t_c из исследуемого агента выделяется какой-то газ, который в целом влияет на интенсивность теплообмена и изменение цвета исследуемой жидкости, а при обычных условиях реакция постепенно идет в обратном направлении, т.е. выделенный газ вновь соединяется с продуктом исследования и цвет исследуемого вещества восстанавливается. Как видно из сделанного анализа, по нашему предположению, указанная реакция является обратимой. Вопрос выделения газа из органических теплоносителей при высоких температурах и обратимости реакции, кроме сказанного, основывается на имеющиеся сведения в литературе. Одним из таких источников является монография К.Эллиса «Химия углеводородов нефти и их производных», в которой рассматривается вопрос термического разложения при различных условиях [5]. Автор на ряде примеров и на основании фундаментальных исследований других экспериментаторов доказывает, что углеводороды при высоких температурах разлагаются с выделением водорода по следующим обратимым уравнениям реакции:



Кроме того, эксперименты, посвященные Р-ρ-Т зависимости шести углеводородов ароматического ряда и их смесей, а также н-гептана, н-гексана, циклогексана и других нефтяных продуктов, которые были проведены соответственно в проблемной лаборатории АГНА и отраслевой теплофизической лаборатории ГНИ им. М.Миллионщикова, показали, что при высоких температурах жидкости (например, для углеводородов ароматического ряда 450°C) они разлагаются, что приводит к увеличению давления в рабочем объеме, т.е. пьезометре [6,4]. В [6] был установлен также интенсивный рост количества продуктов разложения при температуре 500°C по сравнению с 450°C. Отмечается, что в результате разложения выделяется газ и меняется цвет исследуемого продукта.

Наряду с вышеизложенным, следует еще раз подчеркнуть, что в наших исследованиях скачкообразное падение температуры теплоотдающей поверхности стенки трубы (участок ГД, рис.2 и 3) наблюдалось при всех скоростях течения и с увеличением последнего оно перемещалось в сторону возрастания плотности теплового потока. Во всех случаях указанный процесс сопровождался дополнительными эффектами. Это дает основание предположить, что устойчивый режим улучшенного теплообмена возникает под действием двух взаимосвязанных факторов-изменения амплитудно-частотных характеристик процесса и разложения исследуемого вещества в пристеночном слое с выделением газа.

В заключение отметим, что высказанные выше предположения относительно механизма теплообмена при движении жидкости в трубе в условиях сверхкритических давлений являются результатом многолетних исследований и наблюдений, которые, безусловно, могут привести к дискуссии до окончательного решения проблемы. Это обстоятельство требует продолжения поиска в данном научном направлении.

-
1. *Исаев Г.И.* Дис. д-ра техн. наук, Ашхабад, 1991
 2. *Stewart E., Stewart P., Watson A.*//Int. Heat and Mass Transfer, 1973, v 16, №2, P.257 – 269
 3. *Кафенгауз Н.Л., Федоров М.И.*//ИФЖ, Минск, 1968, Т.15, №3, с.455 – 458
 4. *Григорьев Б.А.* Дис. д-ра техн.наук. Грозный, ГНИ, 1979
 5. *Эллис К.* Химия углеводородов нефти и их производных //ДНТИ, М., Гл.редак.хим.л-ры, 1936, Т.1. с.50 – 105
 6. *Ахундов Т.С.* Дис.д-ра техн. наук, Баку, 1974

BÖHRAN TƏZYİQİNDƏN YÜKSƏK TƏZYİQLƏRDƏ İSTİLİK VERMƏNİN MEXANİZMİ HAQQINDA

İSAYEV H.İ., TAĞIYEVA Z.H., RAMAZANOVA S.C., EYYUBOVA K.S.

Böhran təzyiqindən yüksək təzyiqlərdə müxtəlif mayelərlə aparılmış tədqiqatların nəticələrinə əsaslanaraq istilikvermə prosesinin mexanizmini aydınlaşdırmağa cəhd edilmişdir.

ABOUT HEAT EXCHANGE MECHANISM IN SUPERCRITICAL PRESSURE CONDITION OF HEAT CARRIER

ISAYEV G.I., TAGIYEVA Z.Q., RAMAZANOVA S.D., EYYUBOVA K.S.

The results of investigations carried out with different liquids are founded. The attempt to explain the mechanism of heat output process with pressure higher than critical has been done.