

Автореферат  
У-34

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ  
И ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

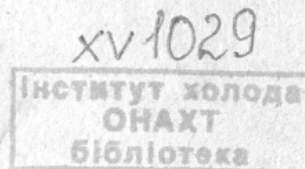
---

А. Г. ЧЕГЛИКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ КАСКАДНОГО МЕТОДА  
СЖИЖЕНИЯ МЕТАНА

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель — академик АН УССР,  
доктор технических наук, заслуженный деятель науки  
и техники УССР, профессор Н. Н. Доброхотов



ОДЕССА — 1962

Диссертационная работа А. Г. Чегликова выполнена в Институте использования газа АН УССР, содержит 173 страницы машинописного текста и 105 рисунков. Список использованной литературы содержит 96 названий.

Исторические решения XXII съезда КПСС, Программа Коммунистической партии вооружили советский народ конкретным научно-обоснованным планом построения коммунистического общества.

Важным этапом на пути построения коммунистического общества является выполнение семилетнего плана развития народного хозяйства СССР, предусматривающего увеличение доли нефти и газа в общем объеме производства топлива в стране с 31% (1958 г.) до 51% (1965 г.), рост добычи и производства газа к 1965 г. до 150 млрд. м<sup>3</sup>, против 30 млрд. м<sup>3</sup> в 1958 г. Намеченный уровень производства газа должен удовлетворить потребность страны в газе как топливе и химическом сырье.

Семилетним планом народного хозяйства СССР предусмотрено форсированное развитие химической промышленности на базе нефти и газа, создание новых более совершенных видов оборудования для металлургии, химии, нефтяной и газовой промышленности. Огромное значение для развития химической и газовой промышленности приобретает искусственный холод. Искусственное охлаждение абсорбента на газобензиновых заводах и заводах синтетического спирта и каучука, низкотемпературные процессы разделения нефтезаводских газов и газов пиролиза, установки получения кислорода и обогащенного воздуха для интенсификации металлургических процессов, сжижение природных газов для извлечения редких газов — вот далеко не полный перечень основных областей применения искусственного холода в химической, газовой и металлургической промышленности. В широких масштабах применяется искусственный холод в пищевой промышленности.

Большое значение для совершенствования установок получения искусственного холода приобретает исследование новых рабочих тел и циклов холодильных установок. Среди различных методов получения глубокого холода одним из самых экономичных по удельному расходу энергии, что, в основном, определяет эффективность работы крупных промышленных установок, является каскадный метод. Несмотря на то, что каскадный метод глубокого

охлаждения был предложен Р. Пикте еще в 1877 г., до настоящего времени выполнено очень мало работ по его исследованию (Кизом, М. Руэман). Недостаточно изучен каскадный метод сжижения метана.

В реферируемой работе изложены результаты аналитического и экспериментального исследования каскадного метода сжижения метана. Изучено влияние рабочих параметров агентов каждого каскада на удельный расход энергии процесса сжижения для различных вариантов каскадной установки, оценено влияние температурных разностей в теплообменных аппаратах и пр. Специальный раздел посвящен изучению факторов, вызывающих снижение коэффициента подачи при уменьшении перегрева паров на всасывании холодильного компрессора при работе на малоизученном холодильном агенте — пропане — рабочем теле первого каскада рассматриваемой установки. Результаты проведенного нами исследования каскадного метода сжижения метана использованы при пуске и наладке промышленной установки сжижения природного газа с высоким содержанием метана по каскадному методу.

#### Методика термодинамического анализа каскадного метода сжижения метана

При термодинамическом анализе каскадного метода сжижения метана принята методика оценки степени термодинамического совершенства отдельных процессов, в основу которой положено рассмотрение процессов с точки зрения учета работоспособной энергии (эксергии) при ее трансформации в отдельных узлах. Для расчета эксергии использовались доступные диаграммы состояния рабочих тел. Термодинамическое совершенство установки можно оценить энергетическим (эксергетическим) коэффициентом полезного действия (ЭКПД),  $\eta$  представляющим отношение минимальной работы ( $AL_{\min}$ ) для достижения результата обратимым путем ко всей затраченной ( $AL$ ),

$$\eta = \frac{AL_{\min}}{AL} = \frac{AL_{\min}}{AL_{\min} + \sum \Delta AL_i} = \frac{1}{1 + \sum K_i}, \quad (1)$$

где:  $\Delta AL_i$  — избыточная работа, обусловленная необратимостью реальных процессов в отдельных узлах установки.

$K_i = \frac{\Delta AL_i}{AL_{\min}}$  — относительный коэффициент потерь.

Аналогичным образом можно оценить термодинамическую эффективность отдельного узла

$$\eta_i = \frac{AL_{i\min}}{AL_i} = \frac{1}{1 + k_i'} \quad (2)$$

Если обозначить энергетический вес отдельного процесса через  $g_i$

$$g_i = \frac{AL_{i\min}}{AL_{\min}},$$

то возможно экпд установки ( $\eta$ ) выразить через значение экпд отдельных узлов ( $\eta_i$ )

$$\eta = \frac{1}{1 + \sum g_i \left( \frac{1}{\eta_i} - 1 \right)}. \quad (3)$$

Для определения экпд отдельных процессов — составных элементов холодильных циклов-каскадов рассматриваемой установки сжижения метана (процесс сжатия агента в компрессоре, дросселирования и теплообмена) — даны уравнения.

Для графического изображения и анализа каскадного метода сжижения метана предложена методика построения рабочих процессов в  $T, G\Delta S$ -координатах; эта методика дополняет существующие методики построения в тепловых диаграммах процессов и циклов, количество рабочего тела в отдельных узлах которых — различно. Предлагаемая методика применима для изображения «разрывных» циклов сжижения газов, холодильных циклов с промежуточным регулированием, бинарных циклов теплоэнергетических установок и пр. При построении процессов в системе координат  $T, G\Delta S$  по оси ординат отсчитывается абсолютная температура, по оси абсцисс — изменение энтропии действительно удельного количества рабочего тела в элементе цикла. При применении в установке нескольких циклов с различными рабочими телами, производится построение каждого цикла с учетом действительного относительного количества рабочего тела и совмещение их по оси абсцисс по характерным точкам смежных циклов. Для каскадной установки сжижения метана характерными точками являются конечное состояние агента верхнего каскада после дросселирования (начало испарения) и конечное состояние в конденсаторе агента нижнего каскада и пр. Наглядность методики иллюстрируется в работе  $T, G\Delta S$ -диаграммами процессов сжижения метана по циклу Линде, холодильного цикла с промежуточным регулированием и каскадного метода сжижения метана для различных режимов установки, на которых показано влияние принятых параметров на значения необратимых потерь.



в качестве рабочих тел каскадной установки сжижения метана можно обеспечить оптимальные температуры даже при небольшом избыточном давлении агентов в испарителях I и II каскадов. Установлено, что повышение температурного напора в испарителях-конденсаторах каскадов на  $1^{\circ}\text{C}$  в пределах  $0-10^{\circ}\text{C}$  вызывает уве-

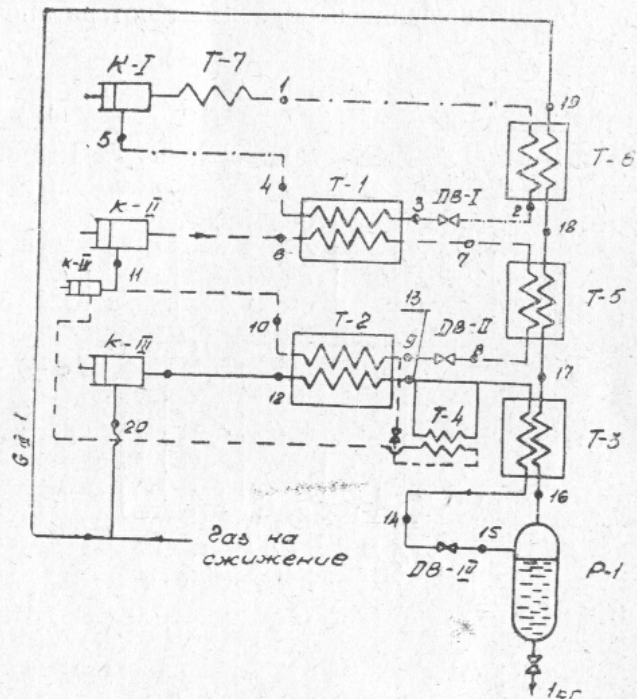


Рис 2 Схема 3-каскадной установки сжижения метана (Вариант II)

личение энергозатрат на 2% для давлений конденсации метана  $10-40 \text{ ата}$  и 1,7% для  $40-70 \text{ ата}$ . Анализ каскадной установки (вариант II) с рассмотренными агентами показывает, что значения ЭКПД всех аппаратов, за исключением теплообменников Т-3, Т-5, Т-6 (рис. 2), высоки и достигают  $0,8-0,98$ , кроме области вблизи критической, для которой характерно резкое падение значения ЭКПД процесса дросселирования метана; ЭКПД теплообменников Т-3, Т-5, Т-6 достигает  $0,2-0,4$ . Вследствие небольшого энергетического веса этих процессов их влияние на ЭКПД установки невелико. ЭКПД идеализированной установки изменяется в пределах  $0,52-0,79$  в зависимости от давления в

конденсаторе III каскада; минимум соответствует критическому давлению. Характер изменения ЭКПД установки от давления в конденсаторе метана аналогичен изменению ЭКПД процесса дросселирования метана. Это дает возможность выразить зависимость ЭКПД установки через значение ЭКПД процесса дросселирования метана.

Для идеализированной установки  $\eta = 0,8 \eta_{\text{дрос. метана}}$ . При учете температурных разностей в конденсаторах ( $10^{\circ}\text{C}$ ), ЭКПД аппаратов уменьшается; для теплообменников Т-1, Т-2 значение ЭКПД снижается на  $20-30\%$ , сохраняется эквидистантность течения зависимости ЭКПД установки от ЭКПД процесса дросселирования метана. Для этого случая  $\eta = 0,67 \eta_{\text{дрос. метана}}$ .

### Экспериментальная установка

Проверка основных результатов аналитического исследования оптимального варианта схемы выполнено на опытной установке, производительность которой составляла  $20 \text{ кг}$  жидкого метана в час. В качестве рабочих агентов каскадов применялись: I—пропан, II—этилен, III—природный газ с содержанием метана свыше  $98\%$  об. Основным балластным компонентом был азот, который периодически выводился из установки с неожившейся частью природного газа. Технологическая схема опытной установки, в основном, соответствовала ранее рассмотренной схеме (вариант II, рис. 2).

Объемом экспериментального исследования предусматривалось:

1. Проверить основные результаты аналитического исследования варианта II трехпоточной каскадной установки сжижения метана, в частности:

- Влияние давления конденсации агента в третьем каскаде на суммарные энергозатраты процесса сжижения.
- Влияние переохлаждения агента III каскада агентом второго каскада перед регулирующим вентилем.
- Определить действительные энергозатраты процесса компримирования агентов в каждом каскаде для всех исследуемых режимов сжижения природного газа.

2. Разрешить ряд технологических вопросов, связанных с эксплуатацией крупных установок такого типа.

- Выбрать и проверить в работе систему очистки этилена от масла, уносимого потоком высокого давления газа из компрессора.
- Проверить влияние на работу аппаратов первого каскада

взаимной растворимости масла и пропана, применяемого в качестве рабочего тела первого каскада.

При экспериментальном исследовании замер параметров производился в период установившегося режима работы. Замерялись следующие величины: количество проходящего через блок агента в каждом каскаде, количество сжижаемого и выводимого из установки природного газа, температуры и давления на входе и выходе из аппаратов блока. Энергозатраты процесса сжижения определялись на основании значений удельных количеств агента, циркулирующего в каждом каскаде, отнесенных к 1 кг сжиженного природного газа и действительных энергозатрат на компримирование агента. Для компримирования агента первого каскада использовались два холодильных компрессора типа И-10. Во II и III каскадах применялись по два однотипных трехступенчатых компрессора фирмы «Кертис» номинальной производительностью 25 м<sup>3</sup>/час. Регулирование производительности установки осуществлялось изменением числа оборотов двигателя внутреннего сгорания, приводившего все компрессоры установки через трансмиссию и отключением отдельных компрессоров. Для конденсации пропана использовались 2 стандартных конденсатора аммиачной холодильной установки типа И-10.

Теплообменные и разделительные аппараты II и III каскадов были специально изготовлены и смонтированы в блоке глубокого холода. Для изоляции блока глубокого холода использовалась мипора. Осушка и очистка природного газа производилась после компримирования твердым едким натром и силикагелем. Давление агентов в характерных точках всех каскадов и после каждой ступени сжатия в компрессорах измерялось пружинными тарированными манометрами, температура — медь-константовыми термопарами, градуировка которых произведена Харьковским институтом мер и измерительных приборов. В колонне глубокого холода было установлено 13 манометров, 23 поверхностных термопары и 32 кармана для низкотемпературных термометров и термопар. Расход агентов в каждом каскаде измерялся нормальными диафрагмами. Количество сжиженного метана определялось путем взвешивания сосуда Дюара, в который сливался жидкий метан из установки. Учет образовавшихся паров производился газовым счетчиком. Для определения действительной работы компримирования агентов проводилось индицирование поршневым индикатором типа Майгак всех ступеней сжатия компрессоров установки и измерение мощности холостого хода. Одновременно с индицированием записывались мгновенные температуры рабочего тела в цилиндре компрессора. Для записи температур, в цилиндре

компрессора устанавливался термометр сопротивления, включенный в плечо неравновешенного моста. Запись показаний термометра сопротивления производилась шлейфным осциллографом типа МПО-2. Термометр сопротивления, выполненный из железной проволоки — 0,02 мм, размещался на специальном датчике в мертвом пространстве цилиндра. Анализ погрешностей измерения мгновенных температур для принятых параметров схемы показывает, что отклонение замеренных температур от истинных не превышает 5°C. При обработке осциллограмм использованы опытные значения коэффициента теплоотдачи от проволоки датчика к среде. По опытным данным определены значения рабочих коэффициентов компрессора, удельной работы сжатия и действительного веса рабочего тела в каждый момент времени в цилиндре компрессора.

#### Результаты исследования сжижения метана на опытной установке

На экспериментальной установке исследован процесс сжижения метана для диапазона давлений в конденсаторе третьего каскада 30÷60 ата. Экспериментально подтверждено наличие максимума энергозатрат для давления, соответствующего критическому давлению метана. Значение расхода энергии, коэффициента сжижения, ЭКПД опытной установки при температурных разностях в конденсаторах 7÷10°C приведено ниже:

1. Давление в конденсаторе третьего каскада, ата	30	40	47,2, (P <sub>кр</sub> )	60
2. Расход энергии, квт-час/кг	1	1,13	1,52	1,22
3. Коэффициент сжижения	0,6	0,5	0,35	0,46
4. ЭКПД установки	0,28	0,25	0,19	0,23

Показано, что переохлаждение метана этиленом в пределах 0÷15°C нецелесообразно при одном давлении испарения этилена.

Основным источником необратимых потерь в установке был процесс компримирования агентов. Относительные потери в компрессорах составили от 175 до 216%  $AL_{\min}$ , что соответствует ЭКПД компрессоров 0,57÷0,465. Относительные потери вследст-

вие теплопритока из окружающей среды составили  $40 \div 50\% AL_{\min}$ . Установлено, что изотермический коэффициент компрессора И-10 при работе на пропане достигает 0,5 при  $P_{\text{вс}} = 2$  ата и  $P_{\text{н}}/P_{\text{вс}} =$

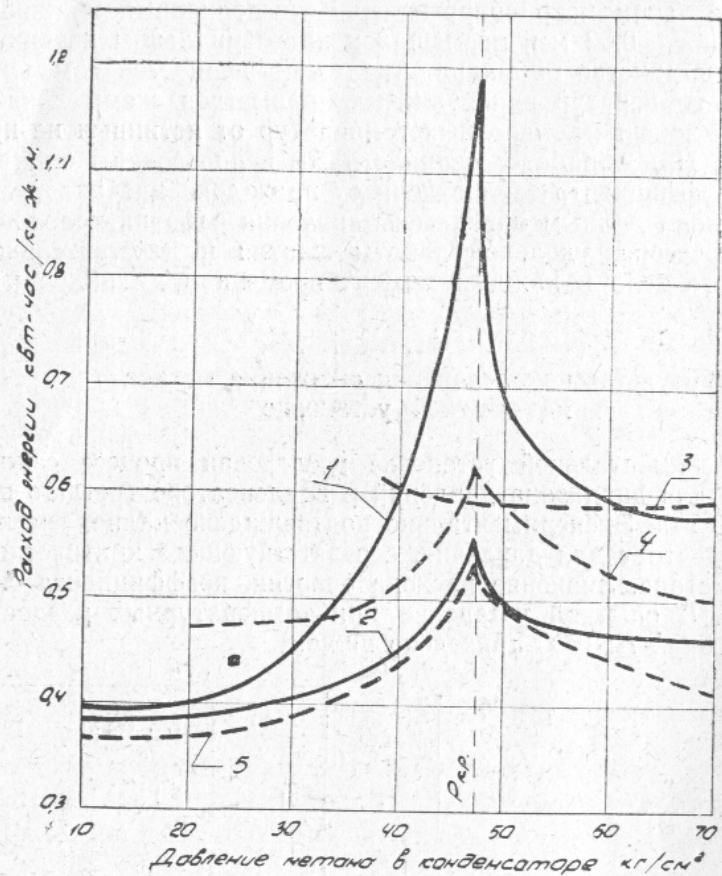


Рис. 3 Сравнение различных вариантов схем идеализированных установок сжижения метана  
 1. вариант I      2. вариант II (с агентами  $C_2H_6-C_2H_6-C_2H_4$ )  
 3. вариант I-2    4. вариант II-2  
 5. вариант II ( $NH_3, CF_2, CH_4$ )

$= 4 \div 5$ , при уменьшении давления всасывания до 1 ата снижается до 0,38. Коэффициент подачи компрессора при всасывании сильно перегретых паров пропана близок к значениям, полученным при

работе на фреоне — 12 и аммиаке. Снижение перегрева паров на всасывании вызывает заметное падение коэффициента подачи. Из результатов исследований следует, что падение коэффициента подачи связано с циклическим переходом части рабочего тела из газообразного в жидкое состояние в конце сжатия и испарением его при ходе обратного расширения. Такое явление может быть объяснено как циклической конденсацией агента в цилиндре так и абсорбцией его маслом. Для отдельного исследования каждого фактора необходимо провести опытное исследование на компрессоре, работа которого возможна при отсутствии смазки. При длительной работе прямого компрессора масло в картере насыщается пропаном, содержание которого близко к равновесному. Из компрессора в конденсатор и испаритель каскада уносится масло. При пуске установки масло, остающееся в испарителе и коммуникациях блока, застывает, образуя пробки. Масло из испарителя и коммуникаций каскада в блоке удалялось продувкой. При установившемся режиме работы каскада образования пробок масла не наблюдалось. Значение изотермического КПД этиленового компрессора составляло 0,49, что значительно ниже, чем рекомендуется в литературе. Установлено, что эффективная очистка этилена от масла, уносимого из компрессора, может производиться крупнопористым силикагелем.

Изотермический КПД компрессора метанового каскада достигал 0,55—0,57.

На основании анализа структуры энергозатрат процесса сжижения метана на опытной установке и анализа работы промышленной установки показано, что основные результаты аналитического исследования могут быть использованы для выбора оптимальных параметров крупных установок сжижения метана без предварительных трудоемких расчетов.

В промышленной каскадной установке сжижения метана, работающей по рассмотренной схеме (вариант II) расходы энергии ниже, чем в установках, реализующих другие циклы при оптимальных параметрах.

#### Исследование причин снижения коэффициента подачи холодильного компрессора при уменьшении перегрева паров на всасывании

В промышленных холодильных компрессорах, работающих на Ф-12 и Ф-11, при снижении перегрева паров на всасывании уменьшается коэффициент подачи. Аналогичное изменение коэффициента подачи установлено нами при исследовании компрессо-



обратного расширения. Количество конденсирующегося пропана в цилиндре может достигать 100% от веса агента, остающегося в мертвом пространстве в газообразном состоянии. Испарение конденсата при обратном расширении газа из мертвого пространства приводит к более пологому течению линии обратного расширения в индикаторной диаграмме, уменьшению количества поступающего в компрессор при всасывании пропана т. е. снижению объемного коэффициента и коэффициента подачи. В конце сжатия агента при небольшом перегреве паров на всасывании температура насыщения в цилиндре может быть выше температуры стенки на 10—20°C. Несмотря на то, что пропан в этот период находится в перегретом состоянии на 10—25°C, возможна частичная конденсация, т. к. температура стенки ниже температуры насыщения (конденсация при перегретом ядре потока пара). Коэффициент теплопередачи для рассмотренных условий может достигнуть 25—30 тыс. ккал/м<sup>2</sup>час°C. Конденсация в исследуемом компрессоре начиналась при уменьшении температуры всасываемого пропана до —3÷—7°C. Циклическая конденсация зависит от термодинамических свойств агента и температуры отдельных участков внутренней поверхности цилиндра. Для предотвращения циклической конденсации рабочего тела в компрессоре необходимо производить полезный перегрев агента или повышать температуру стенки, выше температуры насыщения агента в цилиндре. Увеличение степени перегрева паров на всасывании повышает весовую подачу компрессора, при значительном перегреве — весовая подача снижается.

Для исследуемого компрессора определены значения коэффициентов  $\lambda$ ,  $\lambda_c$ ,  $\lambda_w$ ,  $\lambda_{др}$ ,  $\lambda_r$ , эффективной удельной холодопроизводительности, показателей политроп сжатия и расширения для диапазона отношения давления, нагнетания и всасывания 3,5÷9, как при наличии, так и при отсутствии циклической конденсации пропана в цилиндре.

### Выводы

1. Каскадный метод сжижения метана является одним из наиболее экономичных по удельному расходу энергии. В промышленной установке сжижения метана по каскадному методу целесообразно использовать рассмотренный вариант II схемы с тремя каскадами. В качестве рабочих тел каскадов необходимо принимать доступные и низкие по стоимости углеводороды; в первом каскаде — пропан, пропилен или их смеси; во втором — этилен, в третьем — метан.

В связи с наличием максимума энергозатрат для давления в конденсаторе метана, равном критическому, в промышленных установках сжижения метана, где разность температур в конденсаторе может достигать 10—15°C, давление в метановом каскаде целесообразно принимать равным 60—65 ата.

2. На основании анализа необратимых потерь во всех узлах трехкаскадной установки сжижения метана при значении температурных разностей в конденсаторах 0°C и 10°C установлено:

а) основными источниками потерь в установке являются процессы компримирования, охлаждения и конденсации агента III каскада.

б) энергетический коэффициент полезного действия установки можно выразить через значение ЭКПД процесса дросселирования метана.

3. При сжижении метана вблизи месторождений природного газа с высоким пластовым давлением (150—200 ата) целесообразно использовать двухкаскадную схему установки с холодильным агентом первого каскада — этаном.

Для получения сжиженного метана в конечных пунктах магистральных газопроводов, давление газа в которых составляет 15—20 ата можно использовать трехкаскадную установку с агентами: аммиак — фреон-14 — метан без компримирования агента в третьем каскаде.

4. Для графического изображения и анализа каскадных методов глубокого охлаждения предложена методика построения рабочих процессов в T, GAS-координатах. Эта методика может использоваться для изображения разрывных циклов холодильных установок и циклов, в которых количество рабочего тела в отдельных элементах различно.

5. Анализ погрешностей измерения температуры в цилиндре компрессора, результаты обработки экспериментального исследования рабочих процессов компримирования пропана, этана и природного газа подтверждают высокую точность и эффективность принятой методики исследования поршневых компрессоров, предусматривающей одновременно с индицированием производить регистрацию мгновенных температур агента в цилиндре.

6. Снижение коэффициента подачи поршневого холодильного компрессора при работе на пропане при уменьшении перегрева паров на всасывании связано с циклической конденсацией части рабочего тела в цилиндре в конце сжатия и испарением конденсата при ходе обратного расширения.

7. Для предотвращения циклической конденсации холодильного агента в цилиндре необходимо производить полезный перегрев

агента перед компрессором или повышать температуру стенки. С увеличением перегрева до определенных пределов возрастает весовая подача и холодопроизводительность компрессора.

8. Экспериментально определена равновесная концентрация раствора пропана в масле, применяемом для смазки компрессоров, для диапазона давлений 1—11 ата и температур  $-20 \div +100^{\circ}\text{C}$ .

**Основные результаты выполненных исследований каскадного метода сжижения метана опубликованы в виде статей:**

1. Чегликов А. Г., Анализ каскадного метода получения и возможные пути использования сжиженного метана, Сб. «Материалы научно-технического совещания по сжиженным газам», Одесса, 1959.
2. Чегликов А. Г., О применении T, GDS-координат для графического изображения и анализа процессов холодильных и теплоэнергетических установок. Труды Института использования газа АН УССР, книга 4, 1956.
3. Чегликов А. Г., Исследование каскадного метода сжижения метана. Сб. «Сжижение и разделение углеводородных газов», Труды Института использования газа АН УССР, вып. 2, 1961.