

Автореферат *И. И. Алексееву В.И.*  
К 56 ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

Аспирант  
КОВАЛЕНКО  
ВИКТОРИЯ СЕМЕНОВНА

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ХОЛОДИЛЬНЫХ СИСТЕМ  
С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ХЛАДОНОСИТЕЛЕМ  
ВВЕДЕНИЕМ МАЛЫХ ДОБАВОК  
ПОЛИАКРИЛАМИДА**

(Специальность 05.04.03—гидравлические машины,  
машины и аппараты холодильной и криогенной техники)

**АВТОРЕФЕРАТ  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

ОДЕССА — 1975

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

Аспирант

Коваленко Виктория Семеновна

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХОЛОДИЛЬНЫХ СИСТЕМ  
С ПРОМЕЛУТОЧНЫМ ХЛАДОНОСИТЕЛЕМ  
ВВЕДЕНИЕМ МАЛЫХ ДОБАВОК ПОЛИАКРИЛАМИДА

(Специальность 05.04.03 - гидравлические машины,  
машины и аппараты холодильной и криогенной техники)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Одесса - 1975

XV 1220  
Институт холода  
ОНАХТ  
бібліотека

Работа выполнена на кафедре технической термодинамики  
Одесского технологического института холодильной промышленности.

НАУЧНЫЕ РУКОВОДИТЕЛИ - доктор технических наук, профессор  
Л.З. МЕЛЬЦЕР ;  
доктор технических наук, старший  
научный сотрудник И.Т. ЭЛБЕРИН.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ - доктор технических наук, профессор  
И.Г. ЧУМАК;  
кандидат технических наук  
В.Н. КАЛАШНИКОВ.

БЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ - Государственный проектный институт  
ДНЕПРОГИПРОШАХТ, г. Днепропетровск.

Автореферат разослан " " 1975 г.  
Защита диссертации состоится "21" апреля 1975 г.  
в 15<sup>00</sup> часов на заседании Совета факультетов холодильных  
машин и криогенной техники Одесского технологического  
института холодильной промышленности.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.  
Отзыв на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения просим направить в Совет института по адресу: 270000, г. Одесса. ГСП, ул. Петра Великого, 1/3.

Ученый Секретарь Совета,  
факультетов, доцент

/Г. В. ЛИХНИЦКИЙ/

Иох. В 03-286

- 3 -

#### ЗАДАЧИ РАБОТЫ, АКТУАЛЬНОСТЬ И ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Интенсивное развитие многих отраслей народного хозяйства неразрывно связано с производством холода и его транспортом к потребителям. При проектировании новых и эксплуатации существующих холодильных систем с промежуточным хладоносителем проблема снижения в них гидродинамического сопротивления является важной с точки зрения повышения общей эффективности их эксплуатации. Вопрос этот становится особенно актуальным когда необходимо транспортировать хладоносители и другие жидкости на значительные расстояния (централизованные рассольные системы хладоснабжения, опреснительные и очистительные системы, сброс шахтных вод и т.д.). В этих системах потери напора и холода существенно отражаются на технико-экономических показателях.

В настоящее время для увеличения пропускной способности существующих систем принимаются ряд мер, например: увеличение диаметра труб, прокладка дополнительных трубопроводов или увеличение напора.

Однако необходимо отметить, что перечисленные выше методы являются не всегда эффективными, достаточно сложны, трудоёмки, требуют больших капиталовложений и значительного времени для реализации. В связи с этим разработка новых методов повышения производительности систем хладоснабжения имеет большое практическое значение.

В последние годы стал известен принципиально новый метод повышения производительности гидравлических систем, связанный со снижением в них сопротивления трения. Сущность метода заключается во введении в поток жидкости некоторых поверхност-

но-активных веществ (ПАВ), - лиофильных высокомолекулярных полимеров. Этот способ снижения сопротивления трения требует для своего осуществления весьма простого оборудования и обес- печивает при очень малых добавках ПАВ (порядка  $1 \cdot 10^{-2}$ ;  $1 \cdot 10^{-5}$  по массе) снижение сопротивления на 40 - 80%.

Теоретические и экспериментальные исследования метода снижения гидродинамического сопротивления применительно к течению воды и некоторых других жидкостей проводятся как в СССР, так и за рубежом. В СССР работы по этой проблеме проводятся: в институте проблем механики АН СССР, МГУ, МИСИ, МАИ, Институтах теплофизики и гидродинамики СО АН СССР, Институте тепло- и массообмена АН БССР, Институте гидромеханики АН УССР и в других научно-исследовательских и учебных институтах стра- ны.

К настоящему моменту известны следующие наиболее эффектив- ные гидродинамически активные присадки: полиоксителин, гуаро- вая смола, полиакриламид, карбоксиметилцеллюлоза, полисахарид и др., которые использовались, в основном, при течении воды и нефтепродуктов в температурном интервале  $+20 \pm +100$  °С.

Присадка ПАВ к транспортируемым жидкостям позволяет либо уменьшить мощность, затрачиваемую на электропривод насосов, перекачивающих жидкость, либо уменьшить диаметр трубопроводов и, тем самым, снизить металлоёмкость и капитальные затраты, либо при неизменных параметрах системы повысить её пропускную способность.

Возможность использования нового метода снижения сопротив- ления при транспортировке хладоносителей (рассолов) в системах умеренного холода является весьма перспективной, но недостаточно изученной.

Анализ отечественных и зарубежных литературных данных пока- зал практически полное отсутствие каких-либо данных о влиянии добавки ПАВ на течение солевых растворов повышенных concentra- ций, применяемых в холодильной технике для области отрицатель- ных температур.

Имеющиеся гипотезы, теоретические и практические изыскания, раскрывающие природу эффекта, не позволяют ответить заранее на вопрос о том, как будет вести себя та или иная система с добав- ками ПАВ в различных условиях.

Исходя из этого, были сформулированы основные задачи насто- ящего исследования.

1. Определение влияния полимерных добавок ПАВ на неко- торые физико-химические свойства водосолевых растворов, приме- няемых в качестве хладоносителей.

2. Изучение влияния полимерных добавок на течение хла- доносителей (водосолевые растворы хлористого натрия, хлористо- го кальция). Сюда прежде всего следует отнести:

- а) влияние на течение хладоносителей активирующей добавки полимера и выбор оптимальной её концентрации;
- б) влияние температуры и концентрации соли в хладо- носителе на эффект снижения гидродинамического сопротивления трения.

3. Исследование воздействия полимерной добавки на теплоотдачу со стороны хладоносителя.

4. Определение влияния полимерной добавки на эксплуа- тационные характеристики рассольных центробежных насосов.

5. Изучение процесса деструкции полимерной добавки при транспортировке хладоносителей в циркуляционных системах.

Указанные исследования необходимы для выяснения основных

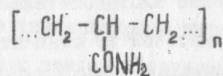
инженерных проблем внедрения нового метода в технику искусственного охлаждения.

Окончательная цель работы - выяснить экономическую целесообразность и наиболее перспективные области применения указанного эффекта в холодильных системах различного назначения.

В соответствии с поставленными задачами выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований. Полученные результаты работы используются в Государственном проектно-институте "днепрогипрошахт" при расчетах и проектировании систем кондиционирования воздуха в глубоких угольных шахтах.

#### ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХЛАДОНОСИТЕЛЕЙ, АКТИВИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ ПОЛИАКРИЛАМИДА.

Объектом исследования являлись вода и водосолевые растворы хлористого натрия и хлористого кальция. В качестве активирующей добавки, снижающей гидродинамическое сопротивление, был выбран полиакриламид (ПАА) со структурной формулой



Это вещество является синтетическим высокомолекулярным полимером в виде геля с молекулярной массой в пределах  $(1 \div 10) \cdot 10^6$ . Он стоит в ряду наиболее эффективных полимерных добавок, обладающих наименьшей деструкцией, является веществом безопасным, не токсичным, обладает ингибиторными антикоррозионными свойствами. Кроме того, его производство освоено у нас в стране рядом химических заводов, что является немаловажным фактором ускорения практического применения нового метода в

различных областях промышленности.

Для определения гидродинамических, теплофизических и эксплуатационных характеристик хладоносителей, активированных добавками ПАА, необходимо знание некоторых эксплуатационно-важных физико-химических свойств этих растворов, таких как: вязкость, плотности, теплопроводность, температура замерзания, концентрация сухого вещества в гелеобразном ПАА и молекулярной массы использованного полимера. Поскольку такие данные отсутствовали, то основным экспериментам предшествовали дополнительные исследования физико-химических параметров трехкомпонентных растворов (вода- соль- добавка ПАА).

В работе приведены описания экспериментальных стечцов для определения вязкости, температуры замерзания, молекулярной массы и методов проведения физико-химических опытов.

Установлено, что выпускаемый в виде геля ПАА, содержащий, согласно заводскому паспорту, 8% сухого ПАА, в действительности обладает различным содержанием сухого вещества. Так, в пяти исследованных партиях ПАА содержание сухого вещества лежало в пределах  $6,9 \pm 10,5\%$  по массе (точность эксперимента  $\pm 0,07\%$ ). Таким образом, при использовании ПАА для растворов точных концентраций необходимо предварительно определять содержание сухого вещества в геле.

Плотность хладоносителей с добавкой ПАА до 0,1% практически не отличается от плотности этих растворов без ПАА. Исследования вязкости хладоносителей, проведенные в диапазоне температур  $+20 \div -20^\circ\text{C}$  с добавками ПАА шести концентраций от нуля до 0,1%, показали, что вязкость хладоносителей возрастает с ростом концентраций добавок. Причем, при

понижении температуры темп увеличения вязкости возрастает, погрешность при определении вязкости не превышала 0,9%.

Следует отметить, что исследуемые промышленные партии ПАА отличались между собой по величине молекулярной массы, так, для исследуемых пяти партий ПАА значение молекулярной массы находилась в пределах  $(1,33 + 5,25) \cdot 10^6$ . Таким образом, разброс по молекулярной массе следует учитывать при составлении растворов. Погрешность в определении молекулярной массы составляла 3,6%.

Обнаружено, что добавка ПАА снижает температуру замерзания хладоносителя и депрессия температуры замерзания возрастает по мере роста концентрации добавки ПАА. Отмечено усиление влияния добавки ПАА на температуру замерзания с ростом концентрации соли. Интересно, что влияние добавок ПАА на температуру замерзания воды не обнаружено. Максимальная депрессия температуры замерзания хладоносителя, равная  $3,5^{\circ}\text{C}$ , была получена на растворе 25,5%  $\text{CaCl}_2$  с добавкой ПАА 0,1%. Погрешность по температуре замерзания составляет  $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ . В работе обсуждаются возможные причины этого интересного явления.

#### ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОБАВОК ПАА К ХЛАДОНСИТЕЛЯМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХОЛОДИЛЬНЫХ СИСТЕМ.

Для предварительного изучения влияния добавок ПАА на течение хладоносителей (солевых растворов повышенных концентраций) в Институте тепло- и массообмена АН БССР были проведены поисковые эксперименты.

Объектом исследования были выбраны водные растворы хлористого натрия с концентрацией соли 10% и 20%. В качестве полимерной добавки использовался ПАА с молекулярной массой  $3,56 \cdot 10^6$  с концентрациями 0,031; 0,055; 0,078 %.

В результате проведенных исследований установлена совместимость солей повышенных концентраций с добавками ПАА, а также обнаружен эффект снижения гидродинамического трения. Максимальное значение составило 50% в диапазоне чисел  $\text{Re}$   $6 \cdot 10^4 + 6 \cdot 10^5$ .

Для выяснения влияния на эффект снижения сопротивления температур, характерных для систем умеренного холода, установка в ИТМО была дополнена холодильным агрегатом ФАК-1,5 и переоборудована для проведения опытов с пониженными температурами хладоносителей. В этой серии опытов исследовались 10% раствор  $\text{CaCl}_2$  с добавками ПАА концентраций 0,07% и 0,1% при температурах  $+20^{\circ}\text{C}$ ,  $+10^{\circ}\text{C}$  и  $-3^{\circ}\text{C}$ .

Результаты этих исследований оказались также весьма обнадеживающими, они показали увеличение эффекта снижения сопротивления трения с понижением температуры.

Таким образом, поисковыми оценочными экспериментами была доказана перспективность использования добавок ПАА к солевым растворам повышенных концентраций при отрицательных температурах. После обоснования целесообразности применения в некоторых холодильных системах умеренного холода рассольных хладоносителей, активированных полимерными добавками, это предложение было защищено авторским свидетельством №416373 от 4.IX.1971 г.

В задачу экспериментальной работы входило значитель-

ное расширение диапазона исследования по выявлению влияния на эффект снижения сопротивления концентраций полимерной добавки, концентрации соли, температуры и режима течения активированных хладоносителей. Необходимо было также провести исследования по выяснению влияния полимерных добавок на теплообмен и на основные характеристики центробежного насоса, а также изучить процессы деструкции полимерной добавки в солевых растворах при их длительной циркуляции в системе.

Для осуществления этих задач была разработана уточненная методика испытаний, и создана комплексная экспериментальная установка, которая была смонтирована в лаборатории термодинамики растворов Одесского технологического института холодильной промышленности.

#### ОСНОВНАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ.

Принципиальная схема установки для комплексного исследования представлена на рис.1. Это система с вынужденным движением жидкости в экспериментальном канале (трубе), которая предусматривает работу как по замкнутому, так и по разомкнутому циркуляционному контуру.

Исследуемый раствор заливался в бак (1), откуда центробежным насосом (2) подавался в рабочий участок трубы (10). Рабочий участок был выполнен из калиброванной медной трубки с внутренним диаметром 18 мм, наружным - 21 мм. Гидродинамическая и тепловая стабилизация потока осуществлялась предвключенными участками, равными 50 калибрам трубы. Перепад давлений на рабочем участке эксперименталь-

ной трубы измерялся на длине 1,5 м дифференциальным манометром (11). Предусматривалась возможность измерения перепада давления на длине 0,75 м. Определение расхода жидкости производилось индукционным расходомером ИР-1М (5) (класс точности I). Плавное регулирование расхода осуществлялось специальной поворотной задвижкой (4) с червячным редуктором. Для охлаждения исследуемого раствора использовался холодильный агрегат ФГК-1,5 (13) с погруженным испарителем змеевикового типа.

Для снятия характеристик насоса в схеме стенда были установлены образцовые манометры (класса точности 0,5) на всасывающей и нагнетательной линиях насоса, а также универсальный измерительный прибор К-50 (3) (класса точности 0,5). Переход к схеме движения жидкости по разомкнутому контуру осуществлялся трехходовым поворотным пробковым краном (12).

При исследовании теплообмена тепловая нагрузка создавалась электронагревателем, регулировалась автотрансформатором и измерялась многопредельным амперметром и вольтметром (класса точности 0,5).

Температура жидкости на входе и выходе из экспериментального участка трубы, а также температура стенки по длине в пяти сечениях измерялась компенсационным методом при помощи медь-константановых термопар диаметром 0,1 мм с использованием низкоомного потенциометра Р-305 (7) (класса - 0,015) и зеркального гальванометра типа М 17/4 (6). Температура в каждом сечении поверхности трубы определялась как среднееарифметическое показаний трех термопар, установленных под углом 120°.

Экспериментальный участок трубы, бак с исследуемым

раствором, а также соединительные трубопроводы были изолированы. Для определения теплотеря рабочего участка трубы в окружающую среду предусматривалась установка терморпар в слое изоляции.

В процессе гидродинамических исследований измерялись: перепад давлений на рабочем участке, расход жидкости, температура исследуемого раствора, давление на нагнетательном и всасывающем патрубках насоса. Перед каждым опытом проводилась замена рабочей жидкости и отбор пробы для определения необходимых физико-химических свойств исследуемого раствора.

В основу методики обработки экспериментальных данных по гидродинамике было взято уравнение Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta P = f \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\omega^2}{2} \cdot \rho \quad (1)$$

Хладоноситель с полимерной добавкой заданных концентраций считался ньютоновской жидкостью. Режим течения определялся критерием Рейнольдса, вычисленным по вязкости исследуемых растворов ( $Re = \frac{d\omega}{\nu}$ ).

Относительное снижение сопротивления трения при транспортировке хладоносителей с полимерными добавками характеризуется величиной эффективности, определяемой по зависимости:

$$\varepsilon = \frac{f - f'}{f} \cdot 100\% \quad (2)$$

Погрешность в определении коэффициента сопротивления трения не превышала 3,6%, числа Рейнольдса - 2,2%.

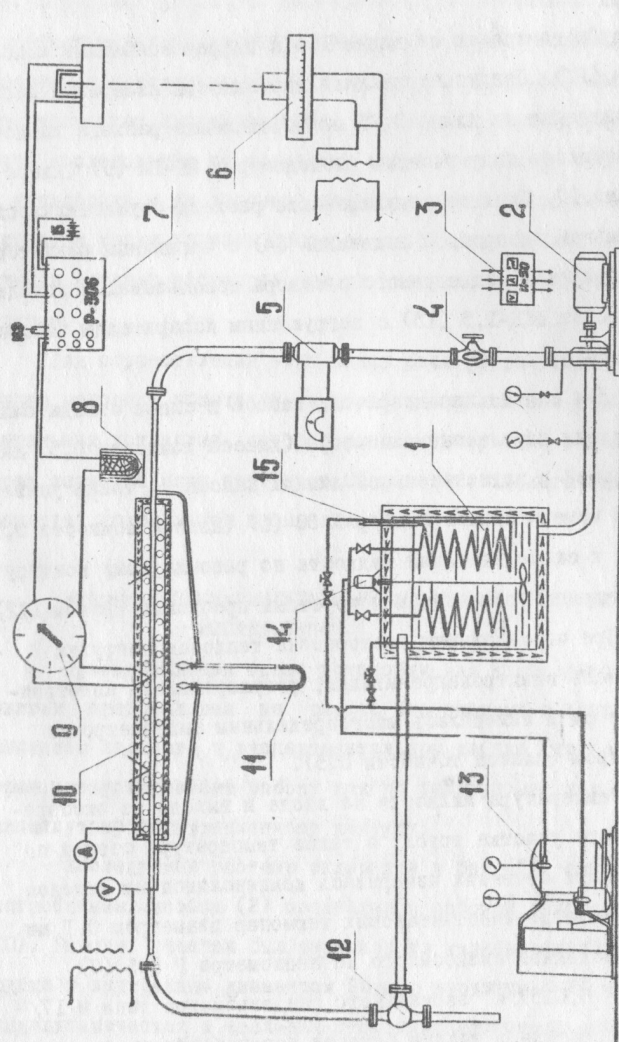


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Основные экспериментальные исследования проводились на растворах хлористого кальция в диапазоне концентраций 0 - 26 %. В качестве полимерной добавки использовался высокомолекулярный полиакриламид ПАА ( $M = 5,25 \cdot 10^6$ ) с концентрациями 0,005; 0,01; 0,03; 0,07 и 0,1 % по массе. Эксперименты проводились в диапазоне температур  $+20 \div -20^\circ\text{C}$ . Интервал значений чисел Рейнольдса составлял  $(9 \cdot 10^3 \div 3 \cdot 10^5)$ .

#### ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК ПОЛИАКРИЛАМИДА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ХЛАДОНОСИТЕЛЕЙ.

В результате проведенных экспериментов по гидродинамике на описанном выше стенде были получены данные о влиянии концентрации добавки полиакриламида, режима течения, концентрации соли в растворе, молекулярной массы активирующей добавки и температуры транспортируемого хладоносителя на эффект снижения сопротивления трения.

Математическая обработка данных исследований производилась с помощью ЭВМ по специально разработанным программам.

Экспериментальные данные по течению хладоносителей с добавками ПАА различных концентраций обрабатывались в виде зависимости  $f = f(Re)$ . На рис.2 представлен характер полученных зависимостей для раствора 20,9% хлористого кальция, который аналогичен для различных концентраций солей в хладоносителе.

Анализ опытных данных показал, что при введении в

хладоноситель добавок ПАА, снижение сопротивления трения наблюдается только при турбулентном режиме течения жидкостей, начиная с определенного порогового значения числа Рейнольдса ( $Re_{\text{пор}}$ ). Это положение согласуется с данными, приведенными в работах многих авторов, которые исследовали течение воды и нефтепродуктов с различными добавками, снижающими сопротивление трения. Из рис.2 видно, что при увеличении концентрации добавок ПАА, значения  $Re_{\text{пор}}$  сдвигаются в сторону меньших чисел Рейнольдса, что расширяет область действия добавки.

Особенностью течения активированных хладоносителей является рост эффективности полимерной добавки при увеличении числа Рейнольдса. На рис.3 представлена зависимость эффективности добавки от концентрации её в растворе. Из приведенных графиков явствует, что с увеличением концентрации эффект снижения сопротивления трения возрастает, но до определенного предела. Максимальное значение эффекта достигается при некоторой оптимальной концентрации полимера. Оптимальная концентрация добавки ПАА для хладоносителей находится в пределах 0,03  $\div$  0,07 %. При увеличении концентрации свыше оптимальной величина эффекта уменьшается.

Установлено, что путем введения добавок ПАА в хладоносители коэффициент гидродинамического сопротивления трения прямолинейных участков трубопроводов может быть снижен на 80%. Это максимальное значение эффекта было получено на растворе хлористого кальция (с концентрацией соли 20,9%) с добавкой ПАА с массовой концентрацией 0,07% при температуре  $-15^\circ\text{C}$  для числа Рейнольдса порядка 30 000.

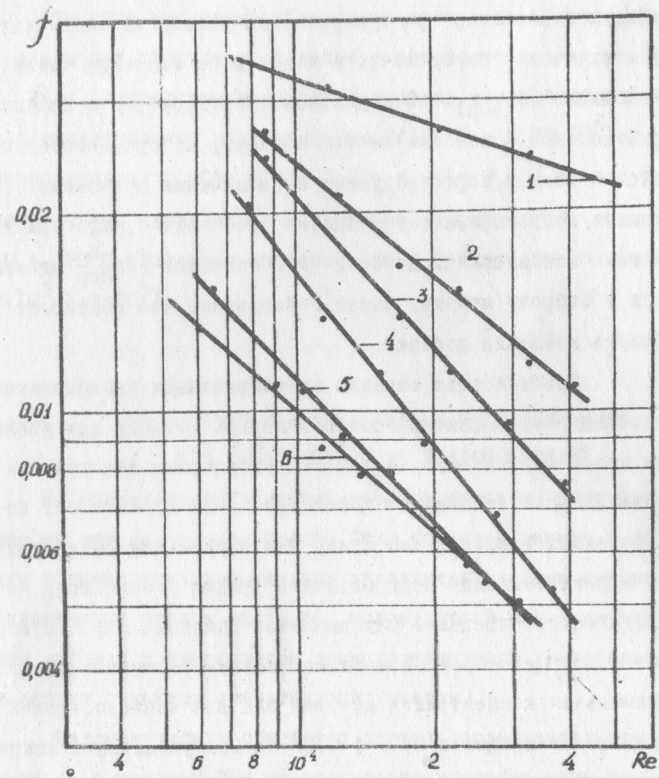


Рис. 2. Зависимость коэффициента сопротивления трения от числа  $Re$  для растворов 20,9%  $CaCl_2$  при температуре  $-15^\circ C$  с добавкой ПАА различных концентраций.

1 -  $C_{ПАА} = 0\%$ ; 2 - 0,005%; 3 - 0,03%;  
4 - 0,03%; 5 - 0,07%; 6 - 0,1%.

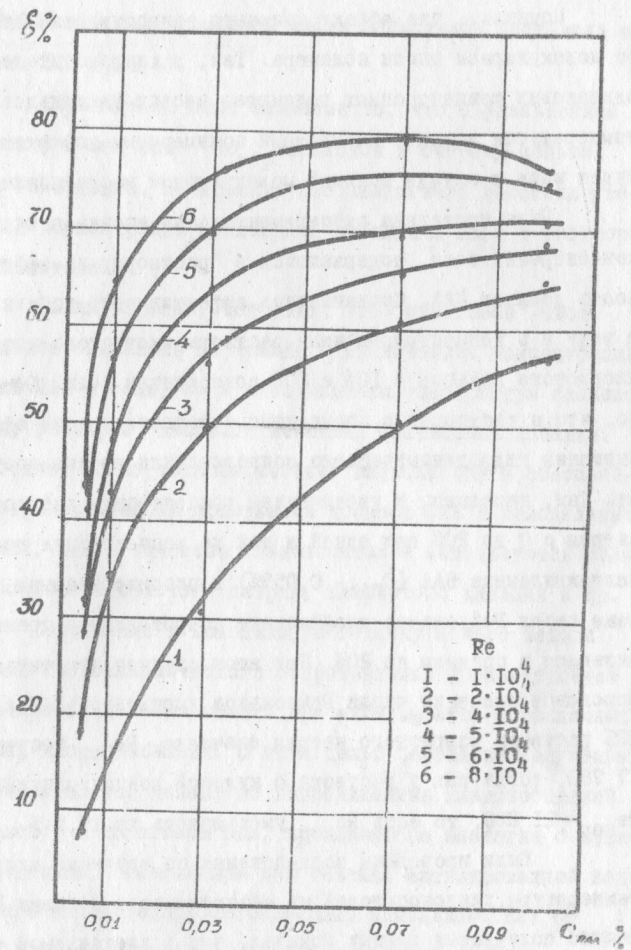


Рис. 3. Зависимость эффективности добавки ПАА от ее концентрации при различных числах  $Re$  для раствора 20,9%  $CaCl_2$ .

XV 1220

ИНСТИТУТ ХОЛОДА  
ОНАХТ  
Библиотека

Показано, что эффект снижения сопротивления зависит от молекулярной массы полимера. Так, в хладоносителе при одинаковых концентрациях полимера, числах Рейнольдса и температурах эффект, вызываемый полимерными добавками, будет выше в случае большей молекулярной массы полимера.

Была проведена экспериментальная оценка влияния концентрации соли, содержащейся в растворе, на эффективность добавки ПАА. Сравнивалась эффективность добавки ПАА в воду и в концентрированные растворы хлористого натрия и хлористого кальция с 10% и 20% содержанием соли. Обнаружено, что в растворах с повышенным содержанием соли эффект снижения гидродинамического сопротивления трения возрастает. Так, например, с увеличением концентрации хлористого натрия с 0 до 20% при одной и той же концентрации добавки полиакриламида ПАА ( $C_{ПАА} = 0,055\%$ ) в рассматриваемом диапазоне чисел Рейнольдса коэффициент сопротивления трения снизился в среднем на 20%. При этом следует отметить, что "пороговое" значение числа Рейнольдса уменьшилось. Так, у 20% раствора хлористого натрия значение  $Re_{пор}$  составляло 17 780, тогда как у раствора с нулевой концентрацией соли  $Re_{пор} = 21\ 880$ , то есть  $Re_{пор}$  уменьшилось на 19,5%.

Были проведены исследования по изучению влияния температуры хладоносителей на эффективность добавки ПАА. Анализ полученных данных показал, что в исследуемой области с понижением температуры эффект снижения сопротивления трения возрастает. Например, уменьшение коэффициента сопротивления при снижении температуры с  $+5^{\circ}C$  до  $-15^{\circ}C$  для раствора 20,9% хлористого кальция с концентрацией добавки

ПАА 0,07% при фиксированном числе Рейнольдса составило в среднем 50% (рис.4).

Обращает на себя внимание то, что с уменьшением температуры значения  $Re_{пор}$  смещаются в сторону меньших чисел Рейнольдса. По эффекту это аналогично действию увеличения концентраций полимерной добавки и соли в растворах хладоносителей.

Таким образом, тот факт, что "пороговое" число Рейнольдса снижается не только с увеличением концентраций добавки ПАА и соли, но и с понижением температуры хладоносителя, расширяет диапазон действия полимерной добавки. Это создает новые технологические возможности и обеспечивает перспективность применения добавок ПАА в холодильных системах, где в качестве хладоносителей используются солевые растворы хлористого натрия, хлористого кальция и др.

Внедрение в холодильную технику нового метода снижения гидродинамического сопротивления трения требует прогнозирования возникающего при этом эффекта в различных системах хладооборудования. С этой целью обобщение полученных экспериментальных данных по гидродинамике хладоносителей (рассолов), с добавками ПАА, проведено по аналогии с известной методикой, применяемой для течения активированной воды. Для этого использованы безразмерные комплексы:  $Re; \frac{Re}{Re_{пор}}; \frac{C}{C_{опт}}$ , с помощью которых экспериментальные данные хорошо обобщаются функциональными зависимостями. Полученные в результате проведенного обобщения эмпирические соотношения позволяют применять их в инженерных расчетах. Коэффициент сопротивления трения при турбулентном течении в форме модернизированного степенного закона сопротивления для

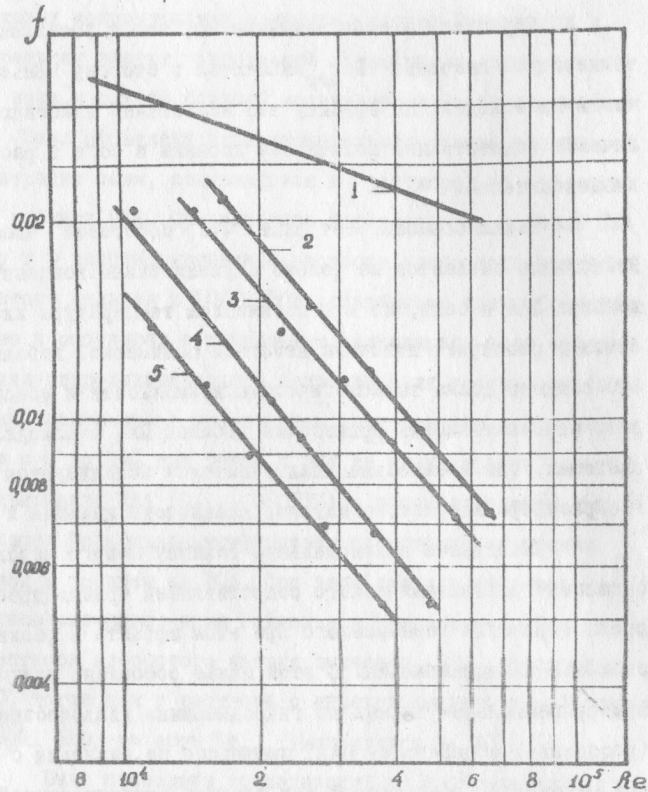


Рис. 4. Зависимость коэффициента сопротивления от числа  $Re$  для раствора  $CaCl_2$  с добавкой ПАА ( $C=0,07\%$ ) при различных температурах.  
1 - линия Блазиуса; 2 -  $t=+5^\circ C$ ; 3 -  $0^\circ C$ ;  
4 -  $-10^\circ C$ ; 5 -  $-15^\circ C$ .

активированных хладоносителей с точностью  $\pm 10\%$  обобщается формулой:

$$f = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \left( \frac{Re_{пор.}}{Re} \right)^\beta \quad (3)$$

где:

$$\beta = 0,69 \left( \frac{C}{C_{опт.}} \right)^{0,375} \quad (4)$$

при  $[C \leq C_{опт.}]$

Значение величины  $Re_{пор.}$  при котором возникает эффект снижения гидродинамического сопротивления трения определена из экспериментальных данных с точностью  $\pm 5\%$  в виде:

$$Re_{пор.} = 6,32 \left( \frac{\Psi d^2}{\tau_{р max} \nu} \right)^{0,57} \quad (5)$$

Величина коэффициента  $\Psi$ , входящая в формулу (5), с точностью  $\pm 15\%$  аппроксимируется эмпирической зависимостью:

$$\Psi = -12,5 \lg \frac{C}{C_{опт.}} + 9,5 \quad (6)$$

Максимальное время релаксации  $\tau_{р max}$  определяется по известной физико-химической формуле:

$$\tau_{р max} = \frac{6 \rho \nu}{\pi^2 k T N} \left[ \frac{\nu' - \nu}{\nu C} \right] \cdot M \quad (7)$$

Эффективность активирующей добавки может быть определена из выражения:

$$\xi = 1 - \left( \frac{Re_{пор}}{Re} \right)^{0,69} (C/C_{опт})^{0,375} \quad (8)$$

Экспериментальные данные по турбулентному течению, активированных добавками ПАА, хладоносителей хорошо обобщаются по выбранной методике с помощью безразмерных комплексов. Это подтверждает принятое допущение об общности механизмов течения солевых растворов и воды, активированных высокомолекулярными добавками.

#### ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ПАА НА РАБОТУ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА.

Возможность применения полимерных добавок в холодильных системах требует изучения влияния их на основные характеристики насоса. Испытания проводились на основном экспериментальном стенде (рис.1), в качестве объекта исследования был использован центробежный насос 2К-6М. Испытания работы насоса были проведены на хладоносителях (хлористый кальций с концентрациями 9; 20,9; 25,5 %), активированных добавками ПАА с концентрациями 0,005; 0,01; 0,03; 0,07; 0,1 %. Погрешность измерения расхода в оплах не превышала 1%, напора - 1,3%, затрачиваемой мощности - 2,03%, КПД - 3,5%. Следует отметить, что характер влияния добавок полиакриламида на основные характеристики насоса при течении солевых растворов различных концентраций аналогичен.

На рис.5 представлены в качестве примера зависимости напора, полезной и затрачиваемой мощностей и КПД насосной установки от расхода для 20,9% раствора хлористого кальция с добавками ПАА различных концентраций. Из приведенных зависимостей явствует, что с ростом концентрации полимера до 0,07% все характеристики насоса улучшаются, дальнейшее же увеличение концентрации ПАА приводит к их ухудшению по сравнению с концентрациями 0,03 + 0,07 %, которые следует считать оптимальными в данном случае.

При рассмотрении зависимости  $H = f(G)$  видно, что с ростом концентрации добавки ПАА характеристика  $H-G$  центробежного насоса улучшается по сравнению с работой насоса на хладоносителе без добавки ПАА. Так, например, 0,07% добавки ПАА к раствору хлористого кальция концентрации 20,9% увеличивает расход в рабочей части характеристики насоса примерно на 52%, при этом напор при постоянном расходе увеличивается на 5,5%.

При работе насоса на хладоносителе с добавками ПАА различных концентраций значение КПД насоса повысилось на 10 - 15 % по сравнению с хладоносителем без ПАА (в рассматриваемом диапазоне расходов).

Затрачиваемая на привод насосной установки мощность с введением добавки ПАА уменьшается на 4 - 14 %. Из рис. 5 видно, что добавки ПАА дают наибольший эффект в области больших расходов. Это аналогично влиянию ПАА на коэффициент сопротивления трения в трубах при течении хладоносителей.

На основании проведенных исследований работы насоса можно заключить, что наиболее эффективным будет

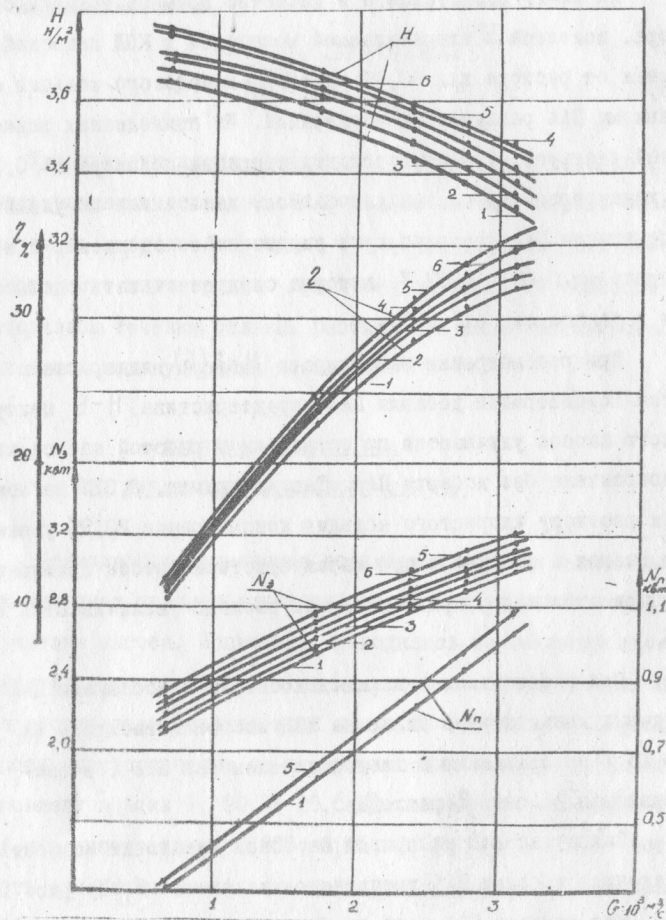


Рис. 5. Зависимость напора, КПД, полезной и затрачиваемой мощностей насоса 2к-6М от расхода при течении 20,9% CaCl<sub>2</sub> с добавкой ПАА различных концентраций.  
 1 - C<sub>ПАА</sub> = 0%; 2 - 0,005%; 3 - 0,01%;  
 4 - 0,03%; 5 - 0,07%; 6 - 0,1%.

применение полимерных добавок для низконапорных высокооборотных насосов.

Таким образом, при течении хладоносителей, активированных добавками ПАА, совместное улучшение характеристик центробежного насоса и снижения сопротивления трубопроводов приведет к увеличению пропускной способности систем и снижению стоимости транспортировки хладоносителей.

#### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ ПАА НА УСЛОВИЯ ТЕПЛООБМЕНА.

При решении вопроса о целесообразности применения нового способа снижения гидродинамического сопротивления трения в холодильных системах возникает необходимость учета влияния полимерных добавок на теплообмен.

В пределах настоящей работы не представилось возможным выполнить в полном объеме исследования по теплообмену активированных рассолов. Выполненные исследования, однако, показали, что качественное влияние добавок на теплообмен аналогично влиянию их на гидродинамическое сопротивление потоку хладоносителя. Экспериментально подтверждено существование аналогии Рейнольдса между гидродинамическим трением и теплообменом при турбулентном течении хладоносителей. Оценка интенсивности теплообмена определялась по соотношениям, предложенным Уэльсом и Смитом:

$$Nu = \frac{f/8 \operatorname{Re} \operatorname{Pr}}{1,02 U_L + \sqrt{f/8} (\operatorname{Pr} - 1) \operatorname{Pr}^{-1/3} + 1,2} \quad (9)$$

$$Nu = 0,125 f Re P_2^{0,4} \quad (10)$$

с привлечением полученных в работе данных о физических свойствах и гидродинамических параметрах хладоносителей с добавками ПАА. Расчеты проводились на ЭВМ по специально составленной программе.

В таблице I приведены некоторые экспериментальные данные по гидродинамике потоков и результаты расчетов теплообмена по формулам (9) и (10).

Как видно из таблицы I, использование добавки ПАА приводит к ухудшению условий теплообмена, причем наиболее существенно снижение коэффициента теплоотдачи имеет место в области больших чисел Рейнольдса.

Для проверки расчетных данных были проведены также экспериментальные исследования на описанной выше установке.

Расчитанные значения коэффициента теплоотдачи дают максимальное отклонение в 20% от экспериментальных данных и, следовательно, могут быть рекомендованы для инженерных расчетов.

Снижение теплоотдачи в магистральных трубопроводах при транспортировке хладоносителей на большие расстояния является положительным фактором, так как при этом уменьшаются потери холода. В этом случае одновременное снижение гидросопротивления и теплообмена создают благоприятные условия транспортировки хладоносителей.

Показано, что в камерных батареях рассольных систем, а также в воздухоохладителях возможное снижение теплоотда-

Таблица I

Концентрация ПАА	Число Рейнольдса	0°C				-15°C			
		Коэф. сопр.	Коэф. теплоотдачи	Снижение сопр.	Снижение интенсивности теплоотдачи	Коэф. сопр.	Коэф. теплоотдачи	Снижение сопр.	Снижение интенсивности теплоотдачи
$C_{ПАА} \%$	$Re \cdot 10^{-3}$	$f \cdot 10^2$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C} \cdot 10^{-3}$	$\epsilon_f \%$	$\epsilon_d \%$	$f \cdot 10^2$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C} \cdot 10^{-3}$	$\epsilon_f \%$	$\epsilon_d \%$
0,00	20	2,70	6,03	-	-	2,65	7,89	-	-
	30	2,40	8,20	-	-	2,42	10,89	-	-
	40	2,28	10,33	-	-	2,28	13,86	-	-
0,005	20	2,60	6,15	3,7	-	1,70	5,03	35,8	36,2
	30	2,05	7,51	14,6	10,9	1,35	6,32	44,2	41,9
	40	1,62	8,69	28,9	15,9	1,15	6,79	49,6	51,0
0,03	20	2,20	4,26	18,5	29,4	0,90	3,11	66,0	66,2
	30	1,20	4,46	50,0	45,7	0,60	3,32	73,5	72,8
	40	0,90	4,56	59,2	55,8	0,49	3,48	78,5	74,9
0,07	20	1,25	3,12	53,7	48,3	0,68	2,32	77,4	70,6
	30	0,76	3,92	68,3	60,2	0,50	2,96	80,5	79,0
	40	0,60	4,06	73,7	67,3	0,39	3,14	83,0	81,1

чи со стороны хладоносителя, вызванное присутствием добавок ПАА, не окажет существенного влияния на общий коэффициент теплопередачи, так как интенсивность теплообмена будет лимитироваться теплоотдачей со стороны воздуха камеры.

В рассольных испарителях снижения теплоотдачи со стороны рассола также неизбежно. Однако, и в этом случае коэффициент теплопередачи испарителя изменится незначительно, поскольку определяющей будет теплоотдача со стороны кипящего агента. Кроме того, в аппаратах холодильных установок скорости течения хладоносителя, как правило, ниже, чем в магистральных трубопроводах, поэтому влияние добавок ПАА на коэффициент

теплоотдачи здесь не столь существенно. В случае наличия в холодильной системе теплообменников (вода-рассол) с соизмеримыми значениями коэффициентов теплоотдачи сред, следует дополнительно производить перерасчет теплопередающей поверхности с учетом снижения коэффициента теплоотдачи. Однако, и в случае рассольных испарителей и теплообменников поверхности устанавливаемых аппаратов часто подбираются с некоторым запасом. Поэтому увеличение теплопередающей поверхности, вызванное снижением коэффициента теплоотдачи при введении добавки ПАА, в ряде случаев не требует замены аппаратов.

#### ДЕСТРУКЦИЯ ПОЛИМЕРА.

Несомненно, что один из отрицательных факторов, которые следует учесть при оценке практических возможностей технического применения эффекта снижения сопротивления, является деструкция (деградация полимера), обусловленная касательными напряжениями на стенке и механическими воздействиями элементов установки (насоса, мешалок и тому подобных).

Изучение закономерностей процесса деструкции является важным для практического использования добавок ПАА в холодильных системах различного назначения и, особенно, в циркуляционных установках. Деструкция проявляется в уменьшении способности полимера снижать гидродинамическое сопротивление трения.

Исследования процессов деструкции были выполнены на растворах 20,9% хлористого кальция с добавками ПАА с концентрациями 0,03 и 0,1% при температурах +5°C и -15°C

на основной экспериментальной установке в процессе длительной циркуляции растворов. При этом, в процессе опыта измерялся перепад давлений на рабочем участке экспериментального трубопровода через определенные промежутки времени при фиксированном расходе.

Оценка процесса деструкции производилась согласно зависимости (2). Полученные при этом результаты обрабатывались в виде зависимости эффективности добавки ПАА  $\xi$  от числа циклов циркуляции раствора  $n$ . Введение величины  $n$  позволило судить о том, сколько раз раствор прошёл через установку и исключило зависимость величины эффективности  $\xi$  от объема раствора, заливаемого в систему. Это позволяет переносить полученные данные на системы большей ёмкости.

Установлено, что деструкция полиакриламида в солевых растворах наблюдается в первое время циркуляции (с течением времени интенсивность её затухает). При течении хладоносителя с добавкой ПАА ( $C_{ПАА} = 0,1\%$ ) при температуре -15°C первоначальный эффект снижения сопротивления трения равнялся 80%. За 750 циклов эффект снизился до 50% и практически оставался постоянным в процессе дальнейшей циркуляции до 1 600 циклов.

Исследования показали, что интенсивность деструкции понижается при увеличении концентрации полимера. Сравнение деструкции хладоносителя, активированного добавками ПАА с концентрацией 0,03% при температурах +5°C и -15°C показало уменьшение интенсивности деструкции с понижением температуры. По-видимому, это объясняется тем, что с понижением температуры повышается прочность химических связей в молекулах полимера, и эти связи труднее разрушаются под действием сдвиговых

напряжений в потоке жидкости. Таким образом, процесс разрушения хладонотенителя можно уменьшать, изменяя параметры процесса (концентрацию, температуру).

Качественно характер разрушения экспериментально подтвержден независимым методом по измерению вязкости проб раствора, периодически отобранных в процессе гидродинамических испытаний. Установлено, что по мере разрушения полимера имело место уменьшение вязкости. Это, в свою очередь, косвенно свидетельствует о разрушении (дроблении) макромолекул полимера в растворе.

Исследования, выполненные в СССР и за рубежом, показали, что интенсивность разрушения полимера зависит от его физико-химических свойств.

Известно, что существуют полимеры с обратимым характером разрушения, способные восстанавливать свои свойства в состоянии покоя (в циркуляционном баке). В последнее время обнаружены полимеры, обладающие минимальной разрушаемостью (при помощи прививок сополимеров, добавки стабилизатора и т.п.). Работы по поиску и исследованию новых, стойких к разрушению полимеров, продолжаются. По мере освоения промышленности производства этих полимеров вопрос о разрушении и ее влиянии на технико-экономические показатели не будет стоять столь остро, как сейчас.

#### ВОЗМОЖНОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ДОБАВОК ПАА В СИСТЕМЕ УМЕРЕННОГО ХОЛОДА С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ХЛАДОНОСИТЕЛЕМ

Метод снижения гидравлических потерь с помощью полимерных добавок наиболее целесообразно применять в хладон-

системах, где имеется достаточно большой расход жидкости и сопротивление трения по длине составляет значительную долю от полного гидравлического сопротивления системы.

Проведенный анализ различных систем хладоснабжения показал, что к таким системам относятся, например: системы кондиционирования воздуха в шахтах, системы хладоснабжения ряда территориально рассредоточенных потребителей холода, системы хладоснабжения искусственных ледяных катков и др.

На основании полученных экспериментальных данных были проведены гидродинамические расчеты некоторых из перечисленных выше систем, в результате которых получены значительные эффекты снижения сопротивления трения при введении в них добавок ПАА. Установлено, что использование добавок ПАА позволит улучшить характеристики стандартного оборудования и оптимизировать инженерные решения задач транспортировки хладонотенителей. В работе даны предварительные рекомендации по выбору активирующей добавки и приведена методика инженерного расчета системы при транспортировке хладонотенителей с добавками полиакриламида.

Расчет экономической эффективности от применения активированных хладонотенителей в холодильной технике проведен по специально разработанной методике на примере систем кондиционирования воздуха в шахтах комбината "Донбассантрацит" и "Артёмуголь". Система кондиционирования воздуха представляет собой разветвленную цепь трубопровода протяженностью 5 000 - 10 000 м, в которой циркулирует  $0,19 + 0,78 \text{ м}^3/\text{с}$  хладонотенителя, холодопроизводительность таких систем составляет  $3,4 + 23,3$  млн Вт. Опыт проектирования и эксплу-

атации глубоких угольных шахт показывает, что затраты на искусственное охлаждение рудничного воздуха весьма значительны и достигают 200 - 500 тыс. руб. в год. Значительная доля этих затрат приходится на расход электроэнергии в системах хладоснабжения. Кроме того, транспортировка холода на большие расстояния для кондиционирования воздуха в шахтах сопряжена со значительными потерями холодопроизводительности из-за значительных гидросопротивлений трубопроводов, теплоотдачи от окружающей среды.

В работе приведена принципиальная схема и описание системы охлаждения воздуха шахты, краткая характеристика её особенностей.

Согласно разработанной методике выполнены расчеты применительно к условиям строительства систем хладоснабжения трех новых горизонтов шахт им. Дзержинского комбината "Донбассантрацит" и им. Ленина. Расчеты показали, что в зависимости от объема хладоносителя в системе введение добавки ПАА позволяет получить экономию по одной шахте за счет снижения затрат электроэнергии на транспортировку хладоносителя и производство холода от 30 000 до 120 000 рублей в год.

Экономия затрат в рассматриваемых системах хладоснабжения, отнесенная к объему транспортируемой жидкости, оценена показателем эффективности ( $\varphi = \frac{3}{\delta \tau}$ ), который с погрешностью  $\pm 5\%$  принят для всех шахт постоянной и равной  $7,9 \cdot 10^3$  руб./м<sup>3</sup>. Полученная величина  $\varphi$  применена в качестве удельного показателя экономической эффективности применения добавок ПАА в системах охлаждения угольных шахт.

Это позволило в зависимости от производительности хладосистемы произвести расчет экономической эффективности от внедрения активирующей добавки в системах кондиционирования шахт комбинатов Донбасса. Суммарный экономический эффект за счет экономии электроэнергии на 16 шахтах комбинатов "Донбассантрацит" и "Артемуголь", проектируемых институтом "Днепрогипрошахт", составляет 930 тыс. рублей в год.

В работе обсуждены и другие пути реализации эффекта снижения сопротивления. Так, при выполнении проекта системы кондиционирования воздуха шахты "Красный Профинтерн" на горизонт 975 м применение добавок ПАА позволяет отказаться от прокладки двух дополнительных трубопроводов  $\varnothing$  300 по 1 000 м каждый, обеспечив при этом необходимый расход хладоносителя. Это позволит уменьшить металлоёмкость системы, упростить её эксплуатацию и при этом сократить затраты на строительство холодильного комплекса на 200 тыс. рублей.

Внедряя результаты проведенных исследований, институт "Днепрогипрошахт" разработал технический проект системы кондиционирования воздуха шахты им. Калинина комбината "Артемуголь", утвержденный Министерством угольной промышленности СССР. Экономия на капитальное строительство по этой шахте составляет 150 тыс. рублей.

#### ВЫВОДЫ

I. На основании проведенного анализа опубликованных теоретических и экспериментальных работ по эффекту снижения гидродинамического сопротивления течения установлено отсутствие каких-либо данных по исследованию этого эффекта при течении низкотемпературных хладоносителей

(рассолов), активированных полимерными добавками.

2. Доказано, что в качестве активирующей добавки для хладоносителей может быть рекомендован полиакриламид (ПАА), как эффективный полимер, отвечающий требованиям, предъявляемым к добавкам, снижающим гидродинамическое сопротивление трения.

3. Экспериментально обнаружено, что температура замерзания хладоносителя заметно снижается при внесении в него весьма малых добавок ПАА. В практически важном диапазоне концентраций ПАА (0,005 + 0,1%) максимальная депрессия температур замерзания, равная  $3,5^{\circ}\text{C}$ , обнаружена для 25,5% раствора хлористого кальция с 0,1% добавкой ПАА.

4. Установлено, что "пороговые" значения числа Рейнольдса ( $Re_{\text{пор}}$ ), начиная с которых наблюдается снижение гидравлических сопротивлений, уменьшаются при увеличении концентрации добавки ПАА, концентрации соли и при понижении температуры. Это расширяет диапазон возможного использования полимерной добавки в системах хладоснабжения.

Экспериментально доказано, что с увеличением числа Рейнольдса и концентрации добавки ПАА эффект снижения сопротивления трения возрастает.

Обнаружено, что с понижением температуры эффективность добавки ПАА значительно возрастает.

5. В результате проведенных исследований установлено, что при добавках ПАА к хладоносителям в количестве 0,005 + 0,1%, снижение сопротивления течению составляет 20 + 80% при числах  $Re$  от  $9 \cdot 10^3$  до  $3 \cdot 10^5$  и в температурном интервале  $+20 + -15^{\circ}\text{C}$ .

Оптимальная концентрация добавки ПАА, при которой, при прочих равных условиях, наблюдается максимальный эффект снижения сопротивления составляет  $0,03 + 0,07\%$ .

6. При работе центробежного насоса типа 2К-6 отмечено улучшение его основных характеристик при введении добавок ПАА в хладоноситель. Производительность насоса при одном и том же напоре может быть увеличена в 1,5 раза. КПД насоса повышается на 10 - 15%.

7. Показано, что с увеличением концентрации полимера в хладоносителе и с понижением температуры раствора интенсивность деструкции уменьшается. При этом установлено, что эффект снижения сопротивления трения стабилизируется на уровне 40 - 50%. Отмечено, что интенсивность процесса деструкции может быть уменьшена при увеличении концентрации ПАА и снижении температуры раствора.

8. Полученные эмпирические зависимости дают возможность производить гидравлические расчеты холодильных систем, работающих на активированных хладоносителях.

9. Экспериментально подтверждена возможность использования известной полуэмпирической аналогии между гидродинамическим трением и теплообменом для оценки влияния добавок ПАА на теплоотдачу со стороны хладоносителя.

10. Разработана методика расчета холодильных систем, применение которой позволяет оценить технико-экономическую эффективность применения активирующих добавок к хладоносителям.

II. Доказана техническая целесообразность и экономическая эффективность применения нового метода снижения гидродинамического сопротивления трения в системах с большим расходом жидкости и значительным сопротивлением по длине. Результаты проведенных исследований доведены до внедрения и используются институтом "Днепрогипрошахт" при проектировании систем кондиционирования воздуха в глубоких угольных шахтах.

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛУ, ИЗЛОЖЕННОМУ В ДИССЕРТАЦИИ.

1. Эльперин И.Т., Мельцер Л.З., Левенталь Л.И., Коваленко В.С., Влияние высокомолекулярных присадок на течение вязкой жидкости. Сб. "Тепло- и массообмен" Минск, "Наука и техника", №3, 1970.
2. Мельцер Л.З., Коваленко В.С., Эльперин И.Т., Левенталь Л.И. Исследование влияния добавок полиакриламида на гидравлические сопротивления рассольных систем. Сб. "Холодильная техника и технология", вып.15, Киев, "Техніка" 1972.
3. Мельцер Л.З., Эльперин И.Т., Коваленко В.С., Левенталь Л.И., Мельцер В.Л. Авторское свидетельство. Хладоноситель для систем умеренного холода. №416373, 4. IX, 1971. Б.И. №7, 1974.
4. Мельцер Л.З., Коваленко В.С. О возможности применения поверхностно-активных веществ во вторичных хладоносителях. Тезисы докладов III республиканской конференции "Повышение эффективности и совершенствование процессов и аппаратов химических производств", Львов, 1973.
5. Мельцер Л.З., Коваленко В.С., Эльперин И.Т., Левенталь Л.И. К вопросу о применении гидравлически активных присадок в холодильной технике. "Инженерно-физический журнал", 25, №6, 1973.

6. Мельцер Л.З., Коваленко В.С., Эльперин И.Т., Левенталь Л.И. Снижение гидродинамических сопротивлений при транспорте хладоносителя. Известия АН БССР, серия физико-энергетических наук, №4, Минск, 1974.
7. Мельцер Л.З., Коваленко В.С., Эльперин И.Т., Левенталь Л.И. Об использовании ПАВ в холодильных системах с промежуточным хладоносителем. Сб. "Холодильная техника и технология", Киев, "Техніка", вып.20, 1975.

Результаты работы докладывались и обсуждались на IV Всесоюзном Советании по тепло- и массообмену в г.Минске (1972г.); на III республиканской конференции "Повышение эффективности и совершенствование процессов и аппаратов химических производств" в г.Львове (1973г.); на Всесоюзном семинаре по "Гидродинамическому воздействию малых полимерных добавок" в г.Москве (1973г.); на 42-й отчетной научной и 43-й юбилейной научно-технической конференциях Одесского технологического института холодильной промышленности (1973, 1974 г.г.).

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.

$l$  - длина рабочего участка трубы;  $d$  - диаметр трубопровода;  $\Delta P$  - перепад давления на измерительном участке;  $\omega$  - средняя (расходная) скорость течения жидкости;  $f, f'$  - коэффициент сопротивления трения хладоносителя

с добавкой полимера и без неё;  $\rho$  - плотность хладоносителя;  $R$  - удельное сопротивление трения;  
 $\nu', \nu$  - вязкость раствора с добавкой полимера и без неё;  
 $Re$  - число Рейнольдса;  $Re_{пор}$  - пороговое значение числа Рейнольдса;  $G$  - расход жидкости;  $\tau$  - время;  
 $n$  - число циклов циркуляции растворов;  $M$  - молекулярная масса полимера;  $U_L^*$  - относительная скорость на границе пограничного слоя;  $\eta$  - к.п.д. насоса;  
 $N_n$  - полезная мощность насоса;  $H$  - напор насоса;  
 $Nu$  - критерий Нусельта;  $Pr$  - критерий Прандтля;  
 $\varphi$  - показатель эффективности;  $\Psi$  - степень разбавленности раствора;  $\tau_{р\ max}$  - максимальное время релаксации молекул полимера в растворах;  $C$  - концентрация полимера в растворе;  $C_{опт}$  - оптимальная концентрация полимера в растворе;  $N$  - число Авогадро;  $T$  - абсолютная температура;  $K$  - постоянная Больцмана;  
 $\epsilon$  - эффект снижения сопротивления;  $\xi$  - экономия затрат при введении добавок ПАА в гидросистему.