

ности удельная мощность установки, состоящей из компрессора и насоса хладагителя,

$$N_{\text{уд}} = (N_{\text{н}}/Q_0) + (1/\epsilon_0). \quad (\text{I-19})$$

На рис. I-18 для иллюстрации энергетического метода расчета приведено примерное определение оптимального режима работы того же испарителя, что и на рис. I-17. Из рис. I-18 видно, что общая картина в основном осталась прежней. Однако есть и некоторые различия. В частности, на рис. I-18 отсутствует резко выраженный на рис. I-17 оптимум для линии, связывающей минимумы кривых для разных q . Это связано с отсутствием влияния первого члена в уравнении (I-18), который, будучи отнесен к 1 кВт холодопроизводительности, возрастает с уменьшением q .

Сопоставление рис. I-17 и I-18 показывает, что хотя результаты энергетического и технико-экономического методов близки, но все же полного соответствия между ними нет. Поэтому при наличии данных о стоимости оборудования всегда следует пользоваться технико-экономическим методом как наиболее точным. При этом, однако, надо помнить, что оптимумы, получаемые в результате технико-экономического метода расчета, образуются очень пологими линиями. Это позволяет допускать довольно значительные отклонения от оптимальных значений скорости хладагителя и плотности теплового потока без значительного увеличения приведенных годовых затрат. Например, из рис. I-17 видно, что повышение q с 1500 до 2500 Вт/м², т. е. на 67 %, приведет к увеличению переменной части приведенных годовых затрат всего на 2 % при одновременном сокращении площади теплопередающей поверхности на 40 % с соответствующим уменьшением стоимости испарителя, его металлоемкости и габаритных размеров.

Отклонения от оптимального режима могут быть допущены по местным условиям при расчете рабочего режима испарителя. При сопоставлении разных аппаратов их лучше не принимать во внимание. Сопоставление по энергетическому методу из-за невозможности определения $q_{\text{опт}}$ надо производить при равных значениях q , близких к известным уже значениям $q_{\text{опт}}$ для аналогичных аппаратов. Желательно также воздерживаться от энергетического сопоставления аппаратов, сильно различающихся по стоимости.

Сопоставление испарителей по массе (металлоемкости) и по габаритным размерам также целесообразно осуществлять при оптимальном режиме их работы с помощью показателей $M_{\text{уд}}$ (кг/кВт) и $V_{\text{уд}}$ (м³/кВт):

$$M_{\text{уд}} = M/Q_0; \quad (\text{I-20})$$

$$V_{\text{уд}} = V/Q_0, \quad (\text{I-21})$$

где M — масса испарителя без хладагента и изоляции, кг; Q_0 — холодопроизводительность испарителя в оптимальном режиме, кВт; V — объем испарителя по габаритным размерам, м³.

Сопоставление по массе и объему может иметь значение главным образом в транспортных холодильных установках. Массу аппарата (металлоемкость) следует принимать во внимание и при проектировании новых аппаратов, конечно, без ущерба для их экономичности. Все же решающим фактором при выборе аппарата должна быть его экономичность, определяемая технико-экономическим или же энергетическим методом.

Глава II

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ ХЛАДАГЕНТОВ В ИСПАРИТЕЛЯХ

II.1. Общие сведения

Кипение — процесс парообразования внутри жидкости, температура которой выше температуры насыщения при данном давлении. Для поддержания стационарного кипения необходим непре-

равный подвод теплоты к кипящей жидкости. Кипение может происходить непосредственно в объеме жидкости, если в ней выделяется теплота (объемное кипение) или резко снижается давление. Второй случай имеет место при дросселировании жидкости в регулирующем вентиле, при протекании жидкости через насос (кавитация), при движении ее по вертикальному трубопроводу, в котором давление насыщения зависит от высоты столба жидкости. В испарителях рекуперативного типа, которые применяются в хладо-технике, теплота к кипящей жидкости подводится от хладоносителя через стенку аппарата, и кипение происходит на твердой поверхности теплообмена. Такой вид кипения называют поверхностным. Если температура жидкости вне слоя, прилегающего к поверхности, ниже температуры насыщения, то процесс парообразования на поверхности называется кипением с недогревом, если она равна температуре насыщения — насыщенным кипением.

В испарителях холодильных машин в зависимости от конструкции аппарата и гидродинамической обстановки в системе жидкость—теплопередающая поверхность реализуются следующие виды кипения: на пучке труб при свободной конвекции; в пленке жидкости, стекающей по поверхности горизонтальных или вертикальных труб; внутри труб и каналов при свободной или вынужденной конвекции кипящей жидкости.

Независимо от условий протекания процесса различают два основных режима кипения: пузырьковый и пленочный, отличающиеся механизмом переноса теплоты.

При пузырьковом кипении паровая фаза образуется на греющей поверхности в виде отдельных паровых пузырьков, которые, находясь на поверхности в течение определенного времени, увеличиваются в объеме, а затем отрываются и всплывают, унося с собой в ядро потока некоторое количество перегретой жидкости из пристенного слоя. К месту отрыва пузыря поступает жидкость из основного объема. Когда она прогреется, процесс зарождения роста и отрыва пузыря повторяется. Таким образом, при пузырьковом кипении жидкость непосредственно омывает поверхность нагрева, а ее пограничный слой турбулизируется растущими и отрывающимися пузырями. Вследствие этого интенсивность теплообмена при пузырьковом кипении может быть высокой.

При пленочном кипении на поверхности нагрева образуется сплошная пленка пара, периодически прорывающаяся в объем жидкости. В этом случае поверхность отделена от жидкости мало-теплопроводным паровым слоем, из-за чего интенсивность теплоотдачи резко снижается в сравнении с пузырьковым кипением.

Форма паровых пузырей и условия существования различных режимов кипения зависят от того, смачивает ли жидкость твердую поверхность (вода, хладагенты) или не смачивает (ртуть и др.). Дальнейшее изложение относится к жидкостям, смачивающим поверхность теплообмена.

Для уяснения закономерностей теплоотдачи при кипении в аппаратах необходимо рассмотреть процесс, называемый кипением в большом объеме, как имеющий наиболее общий характер и позволяющий установить ряд качественных особенностей и количественных соотношений, необходимых для расчета испарителей различных типов и выявления путей их интенсификации.

II.2. Теплообмен при кипении в большом объеме

II.2.1. Влияние температурного напора на теплообмен

Согласно терминологии по теории теплообмена, кипением в большом объеме называется кипение при свободном движении в объеме жидкости, размеры которого по всем направлениям велики по сравнению с отрывным диаметром пузыря. Примером такого процесса является кипение на поверхности одиночной трубы или пластины, погруженных в большой в сравнении с ними объем жидкости. При этом гидродинамика процесса определяется собственно парообразованием, а образующийся пар свободно удаляется от поверхности нагрева.

Рассмотрим процесс теплообмена между погруженным в жидкость плоским нагревателем при постоянном давлении над жидкостью p и соответствующей ему температуре насыщения t_0 . Подвод теплоты к нагревателю может быть осуществлен либо с помощью циркулирующего в нагревателе теплоносителя, либо с помощью электронагревателя.

В первом случае при пренебрежимо малом изменении температуры греющей жидкости и малом термическом сопротивлении между ней и стенкой можно считать, что температура поверхности приблизительно постоянна ($t_{ст} \cong \text{const}$), т. е. заданы граничные условия I рода. Изменяя температуру теплоносителя, мы будем менять величину температурного напора $\theta = t_{ст} - t_0$. Коэффициент теплоотдачи для данной жидкости при определенных давлении и площади поверхности будет зависеть только от θ , а плотность теплового потока — определяться из закона Ньютона: $q = \alpha \theta$.

При электрообогреве независимо заданной является плотность теплового потока от нагревателя к жидкости (граничные условия II рода), температурный напор θ будет определяться условиями теплообмена, а коэффициент теплоотдачи — также законом Ньютона.

Характер зависимости α от θ при граничных условиях I рода представлен на рис. II-1, а.

При малых температурных напорах (участок СК) теплота от греющей поверхности передается жидкости путем свободной конвекции. Паровые пузыри на поверхности нагрева и тем более в жидкости отсутствуют.

При более высоких температурных напорах (участок НР) на поверхности нагрева образуются паровые пузыри, но число их невелико, причем часть из них разрушается силами поверхностного